Chapitre 2 : CAPTEURS DE TEMPÉRATURE

2-1) Les échelles de température

a) Échelles thermodynamiques ou absolues

- Échelle de Kelvin : L'unité est le Kelvin (K) ; elle résulte de la fixation à 273,16 de la valeur de la température du point triple de l'eau (température d'équilibre eau-glace-vapeur).
- Échelle de Rankin : L'unité est le degré Rankin (°R), qui est égal à 5/9 de Kelvin ; la température du point triple de l'eau a donc pour valeur : 491 ,69°R.

b) Échelles dérivées des échelles thermodynamiques

- Échelle Celsius : Elle est déduite de l'échelle absolue de Kelvin et son unité, le degré Celsius (°C) , est égale à un kelvin. T (°C) = T(K) - 273, 15
- Échelle Fahrenheit : Elle s'obtient par décalage des valeurs de l'échelle absolue de Rankin, son unité, le degré Fahrenheit (° F), étant égale à un degré Rankin : T (°F) = T (0R) - 459,67.

Conversion entre échelles de Celsius et de Fahrenheit :

$$T\ (^\circ\mathrm{C}) = \left(T(^\circ\mathrm{F}) - 32\right)\frac{5}{9} \qquad\qquad T\ (^\circ\mathrm{F}) = \frac{9}{5}T\ (^\circ\mathrm{C}) + 32$$

2-2) Thermométrie par résistance

2-2-1) Résistances métalliques

Selon le domaine de température où elles seront utilisées et des qualités particulières recherchées, on réalise les résistances en platine, en nickel et, plus rarement, en cuivre et en tungstène.

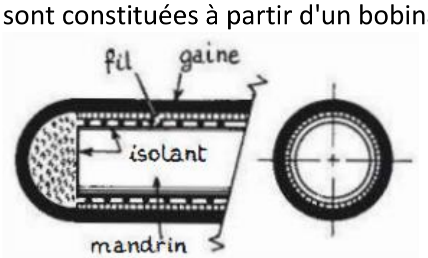
Résistance de platine

Dans une plage de température qui s'étend d'environ -200 °C jusqu'au voisinage de 650 ° C, la valeur de la résistance d'un f de platine très pur permet de définir sa température à moins de 0,1 °C près, à partir de la formule de Calendar - Van Dusen :

$$\frac{R(T)}{R(0)} = 1 + AT + BT^2 + C\,(T - 100)\ T^3$$

Avec : $C = 0$ pour $T > 0\,^\circ\mathrm{C}$ et $R(0)$ est la résistance mesurée à $0\,^\circ\mathrm{C}$,

- Sondes à immersion : Elles sont destinées à être plongées dans le milieu dont la température est à mesurer et sont constituées à partir d'un bobinage hélicoïdal.



- Sondes de surface : Destinées à la mesure des températures superficielles elles se présentent comme des jauges d'extensométrie.

2-2-2)Thermistances

La propriété primordiale de ce type de résistance est une sensibilité thermique très supérieure, de l'ordre de 10 fois, à celle des résistances métalliques. Elles sont constituées à partir de mélanges d'oxydes métalliques semi-conducteurs polycristallins.

Elles sont caractérisées par :

- un faible encombrement permettant la mesure quasi ponctuelle de la température ;
- une capacité calorifique réduite rendant possible des vitesses de réponse élevées.

La relation de la résistance est donnée par :

$$R(T) = R_o \left(\frac{T}{T_o}\right)^{-b} \cdot \exp\left(\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right)\right)$$

R_0 étant la résistance à la température absolue T_0 . b et β sont des constantes caractéristiques du matériau.
Le coefficient de température de la résistance ou sensibilité thermique à la température T s'écrit :

$$\alpha_R = \frac{1}{R(T)} \cdot \frac{dR}{dT} \quad \Rightarrow \quad \alpha_R = \frac{\beta + bT}{T^2}$$

2-3)Thermométrie par thermocouple :

Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B formant entre eux deux jonctions aux températures T1 et T2 délivre une f.é.m. $E_{A/B}^{T_1T_2}$ qui dépend, d'une part, de la nature des conducteurs A et B et, d'autre part, des températures T1 et T 2. En général, la température de l'une des jonctions est fixe, connue et sert de référence.
La sensibilité thermique d'un couple ou *pouvoir thermoélectrique* s, à une température Tc, est définie par l'expression :

$$s(T_c) = \frac{dE_{A/B}^{T_c 0\ °C}}{dT_c}$$

elle est fonction de la température et s'exprime en µV/° C.

Différents types de thermocouples :

E : Chromel/Constantan

J : Fer/Constantan

T : Cuivre/Constantan

K : Chromel/Alumel

R : Platine-Rhodium(13%)/Platine

S : Platine-Rhodium(10%)/Platine

B : Platine-Rhodium(30%)
/Platine-Rhodium(6%)

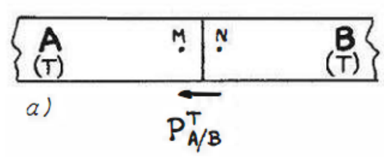
N : Nicrosil(nickel, chrome, silicium)
/Nisil (nickel, silicium)

2-3-1)Effets thermoélectriques

Effet Peltier

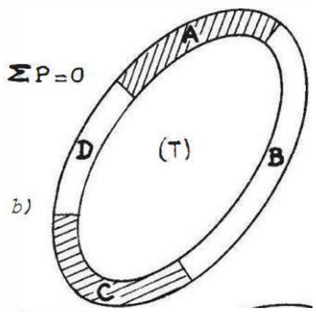
À la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à même température T s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température :

$$v_M - v_N = P_{A/B}^{T}$$



Loi de Volta

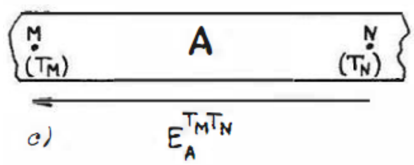
Dans un circuit isotherme constitué de conducteurs différents la somme des f.é.m. de Peltier est nulle.



$$P^T_{A/B} + P^T_{B/C} + P^T_{C/D} + P^T_{D/A} = 0$$

Effet Thomson

Entre deux points M et N à température différente, à l'intérieur d'un conducteur homogène A s'établit une f.é.m. ne dépendant que de la nature du conducteur et des températures TM et TN :



$$E_A^{T_M T_N} = \int_{T_N}^{T_M} h_A \mathrm{d}\, T$$

C'est la f.é.m. de Thomson ; h_A coefficient de Thomson du conducteur A est une fonction de la température.

Effet Seebeck

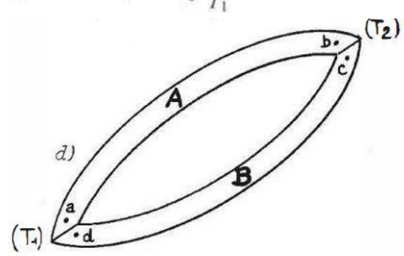
Soit un circuit fermé, constitué de deux conducteurs A et B dont les jonctions sont aux températures T1 et T2 : il constitue un couple thermoélectrique. Ce couple est le siège d'une f.é.m. dite de Seebeck $E_{A/B}^{T_2 T_1}$ qui résulte des effets Peltier et Thomson qui s'y produisent. On a en effet :

– f.é.m. entre a et b : $e_{ab} = \int_{T_1}^{T_2} h_A \mathrm{d}\, T$; f.é.m. entre b et c : $e_{bc} = P^{T_2}_{A/B}$;

– f.é.m. entre c et d : $e_{cd} = \int_{T_2}^{T_1} h_B \mathrm{d}\, T$; f.é.m. entre d et a : $e_{da} = P^{T_1}_{B/A}$.

La f.é.m. totale, somme des f.é.m. précédentes, est la f.é.m. de Seebeck :

$$E_{A/B}^{T_2 T_1} = P^{T_2}_{A/B} - P^{T_1}_{A/B} + \int_{T_1}^{T_2} (h_A - h_B)\mathrm{d}\, T$$



Loi des métaux successifs

Cette relation, dite loi des métaux successif s, permet de déduire la f.é.m. de Seebeck du couple A/ C lorsque l'on connaît les f.é.m. de Seebeck que délivrent les couples constitués des conducteurs A d'une part, C d'autre part, associés à un troisième conducteur B.

$$E_{A/C}^{T_2 T_1} = E_{A/B}^{T_2 T_1} - E_{C/B}^{T_2 T_1}$$

Loi des températures successives

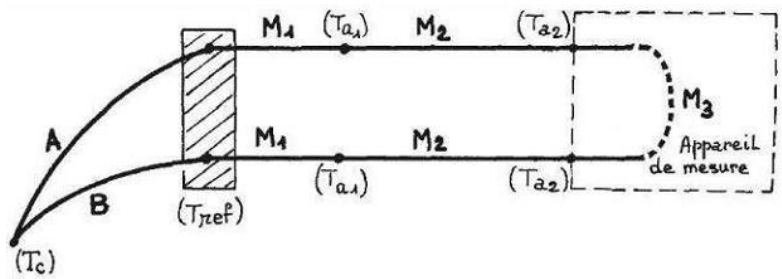
Lorsque la température T, considérée ici comme température de référence prend une nouvelle valeur T' , la f.é.m. de Seebeck du couple A/B passe de la valeur $E_{A/B}^{T_2 T_1}$ à la valeur $E_{A/B}^{T_2 T_1'}$:

$$E_{A/B}^{T_2 T_1} = E_{A/B}^{T_2 T_1'} + E_{A/B}^{T_1' T_1}$$

2-3-2) Montages de mesure

Le montage généralement utilisé est schématisé dans la figure ci-dessous. À condition que soient deux à deux à la même température :

- les jonctions de référence du thermocouple (A/ M1 et B / M1) ;
- les jonctions des métaux intermédiaires faisant partie de l'ensemble de liaison et de mesure (M1 / M2 ; Mi / M3).



$$e = P_{A/B}^{T_c} + \int_{T_c}^{T_{ref}} h_B \,\mathrm{d}T + P_{B/M_1}^{T_{ref}} + \int_{T_{ref}}^{T_{a_1}} h_{M_1} \,\mathrm{d}T + P_{M_1/M_2}^{T_{a_1}} + \int_{T_{a_1}}^{T_{a_2}} h_{M_2} \,\mathrm{d}T$$
$$+ P_{M_2/M_3}^{T_{a_2}} + \int_{T_{a_2}}^{T_{a_2}} h_{M_3} \,\mathrm{d}T + P_{M_3/M_2}^{T_{a_2}} + \int_{T_{a_2}}^{T_{a_1}} h_{M_2} \,\mathrm{d}T + P_{M_2/M_1}^{T_{a_1}}$$
$$+ \int_{T_{a_1}}^{T_{ref}} h_{M_1} \,\mathrm{d}T + P_{M_1/A}^{T_{ref}} + \int_{T_{ref}}^{T_c} h_A \,\mathrm{d}T$$

$$\text{soit : } e = P_{A/B}^{T_c} - P_{A/B}^{T_{ref}} + \int_{T_c}^{T_{ref}} (h_A - h_B) \,\mathrm{d}T = E_{A/B}^{T_c T_{ref}}$$

2-3-3) La température de référence

La f.é.m. du thermocouple dépend à la fois de la température Tc de la jonction placée au point de mesure et de la température, T_{ref}, de ses jonctions avec les fils de liaison. Pour ce qui est de cette dernière, on peut distinguer trois cas :

- T_{ref} = 0 °C ;
- T_{ref} est constante mais différente de 0 ° C ;
- T_{ref} est variable, généralement égale à la température ambiante.

a) La température de référence est 0 ° C

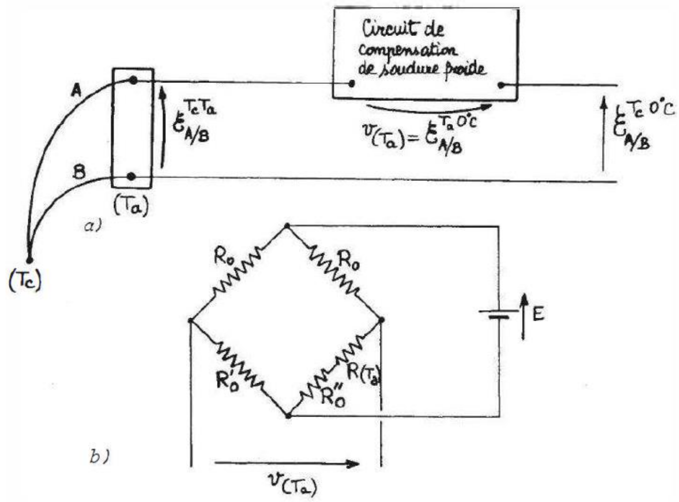
La mesure de la f.é.m. du thermocouple permet dans ce cas de connaître immédiatement la température J: à l'aide de la Table du thermocouple utilisé.

b) La température de référence est constante mais différente de 0 ° C

La connaissance de T_{ref} permet, à l'aide de la Table du thermocouple, de calculer $E_{A/B}^{T_{ref} 0^0 C}$; la mesure de la f.é.m. du thermocouple fournit une valeur correspondant à $E_{A/B}^{T_C T_{ref}}$; on en déduit la f.é.m. dont le thermocouple serait le siège si la température de référence était 0 °C : $E_{A/B}^{T_c\ 0\ °C} = E_{A/B}^{T_c\ T_{ref}} + E_{A/B}^{T_{ref} 0\ °C}$

c) La température de référence est variable et égale à la température ambiante

Il existe des circuits, dits de correction de soudure froide, qui délivrent automatiquement une tension v(Ta) égale à $E_{A/B}^{T_a 0^0 C}$; celle-ci, ajoutée à la fé.m du thermocouple $E_{A/B}^{T_C T_a}$, permet d'avoir aux bornes du circuit de mesure la f.é.m. $E_{A/B}^{T_C 0^0 C}$.



La tension v(Ta) est obtenue à partir d'une résistance thermométrique maintenue à la température ambiante.
Le pont de Wheatstone permet la correction de soudure froide pour des variations de la température ambiante autour de 0 °C.
Les résistances R_0, R'_0; et R''_0; ne dépendent pas de la température alors que la résistance thermométrique R(Ta) en est une fonction linéaire, de coefficient de température α_R.
Le pont est équilibré à 0 °C ; on montre facilement qu'à la température Ta la tension de déséquilibre du pont a pour valeur :

$$v(T_a) = E \cdot \frac{R_o(R'_o - R''_o)}{(R_o + R'_o)^2} \cdot \alpha_R \cdot T_a.$$

Les valeurs numériques des composants du pont sont choisies de façon que :

$$E \cdot \frac{R_o(R'_o - R''_o)}{(R_o + R'_o)^2} \cdot \alpha_R \cdot T_a = E_{A/B}^{T_a 0\ ^\circ\mathrm{C}}$$

2-4) Thermométrie par diodes et transistors

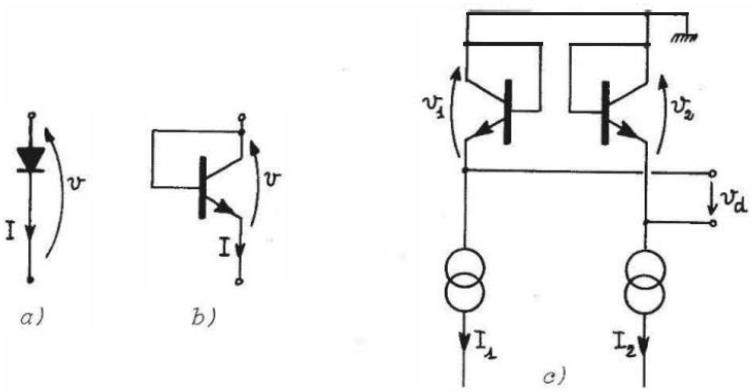
Les composants utilisés, diodes ou transistors au silicium montés en diode (base et collecteur reliés), sont alimentés dans le sens direct à courant I constant : la tension v à leurs bornes, qui est fonction de la température peut donc être la grandeur électrique de sortie du capteur de température qu'ils constituent.
Dans une diode ou transistor monté en diode, le courant I est lié à la tension v par la relation:

$$I = I_o \left(\exp\left(\frac{qv}{kT}\right) - 1 \right), \quad T \text{ en K}$$

qui, en polarisation directe (I>> I_0) se ramène à :

$$I = I_o \cdot \exp\left(\frac{qv}{kT}\right)$$

$$\text{où} \qquad I_o = CT^m \cdot \exp\left(\frac{-qv_\Phi}{kT}\right)$$



Composants utilisés en capteurs de température : a) diode; b) transistor monté en diode; c) transistors appairés montés en diodes.

Deux transistors Q_1 et Q_2 appairés (*figure 6.30a*), de même courant I_0, sont alimentés à courants constants I_1 et I_2 ; leurs tensions base-émetteur sont v_1 et v_2 :

$$I_1 = I_o \exp \frac{qv_1}{kT}, \quad \text{soit} \quad v_1 = \frac{kT}{q} \mathrm{Log} \frac{I_1}{I_o}$$

$$I_2 = I_o \exp \frac{qv_2}{kT}, \quad \text{soit} \quad v_2 = \frac{kT}{q} \mathrm{Log} \frac{I_2}{I_o}$$

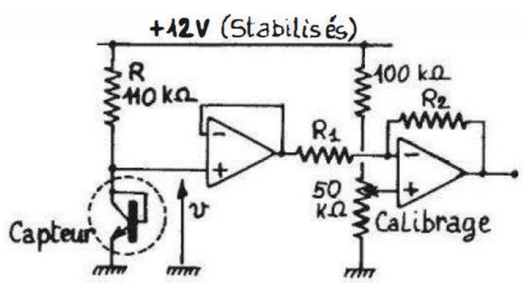
La mesure de la tension différentielle $v_d = v_1 - v_2$ permet d'éliminer l'influence de I_0 :

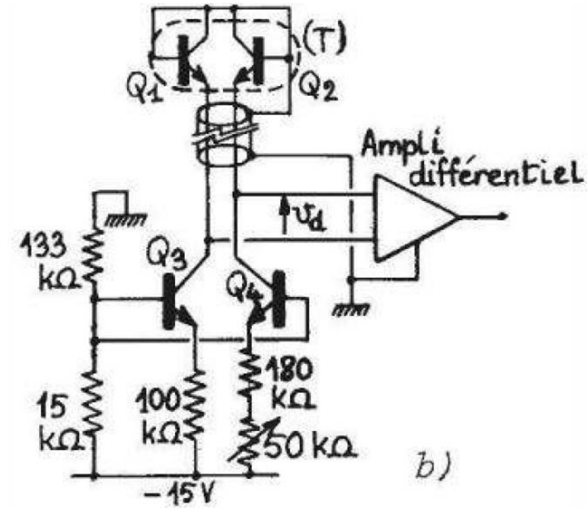
$$v_d = \frac{kT}{q} \cdot \mathrm{Log} \frac{I_1}{I_2} = \frac{kT}{q} \mathrm{Log} n$$

où n est le rapport des courants constants. Numériquement on a :

$$v_d \cong 86{,}56 \cdot T \mathrm{Log} n \qquad v_d \text{ en } \mu\mathrm{V}, \quad T \text{ en K}$$

Montages de mesure :




(T)
Q1
Q2
Ampli différentiel
vd
133 kΩ
Q3
Q4
180 kΩ
15 kΩ
100 kΩ
50 kΩ
b)
−15 V