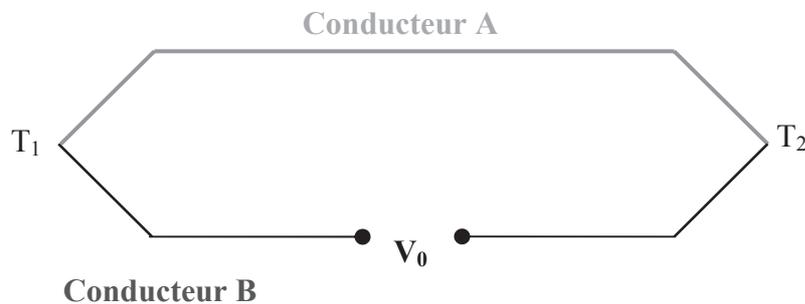


CHAPITRE 6 : LES THERMOCOUPLES

6.1 PRINCIPE

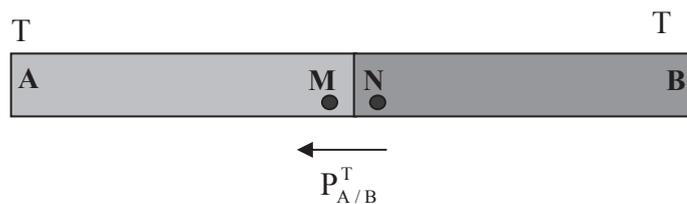
Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B de nature différente, dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 délivre une f.e.m V_0 qui dépend d'une part de la nature de A et B, et d'autre part des températures des deux jonctions. En général, la température de l'une des jonctions est fixe, connue et sert de référence ($T_1=T_{ref}$), tandis que l'autre jonction est placée dans le milieu dont on cherche à mesurer la température. La jonction à la température T_1 est également appelée soudure froide et celle à la température T_2 soudure chaude.



6.2 LES EFFETS THERMOELECTRIQUES

Le fonctionnement des thermocouples est basé sur plusieurs phénomènes thermo-électriques.

6.2.1 L'effet Peltier



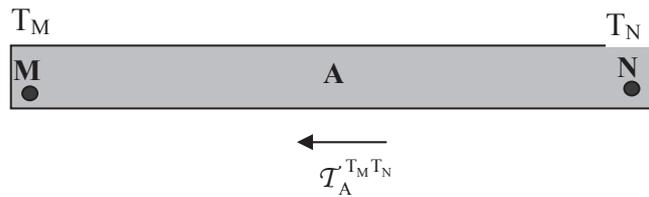
A la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température T , s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température, c'est la f.e.m de Peltier :

$$V_M - V_N = P_{A/B}^T$$

Loi de Volta : dans un circuit isotherme constitué de conducteurs différents, la somme des f.e.m de Peltier est nulle. On a donc :

$$V_M - V_N = P_{A/B}^T$$

6.2.2 L'effet Thomson

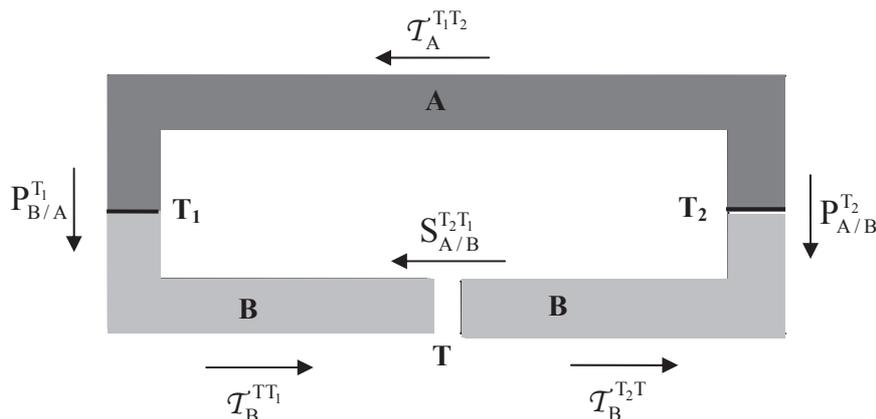


Entre deux points M et N de températures différentes T_M et T_N qui se trouvent à l'intérieur d'un conducteur A homogène, s'établit une force électromotrice, qui ne dépend que la nature du conducteur et des températures T_M et T_N , c'est la f.e.m de Thomson :

$$\mathcal{T}_A^{T_M T_N} = \int_{T_N}^{T_M} h_A dT$$

avec h_A le coefficient de Thomson du conducteur qui dépend de la température.

6.2.3 L'effet Seebeck



On considère le circuit électrique fermé ci-dessus, constitué des deux conducteurs A et B dont les jonctions sont aux températures T_1 et T_2 . ce circuit constitue un couple thermoélectrique et est le siège d'une f.e.m dite de Seebeck $S_{A/B}^{T_2 T_1}$ qui résulte des effets de Peltier et de Thomson qui s'y produisent :

$$S_{A/B}^{T_2 T_1} = \mathcal{T}_B^{T_2 T} + P_{A/B}^{T_2} + \mathcal{T}_A^{T_1 T_2} + P_{B/A}^{T_1} + \mathcal{T}_B^{T T_1}$$

ou encore :

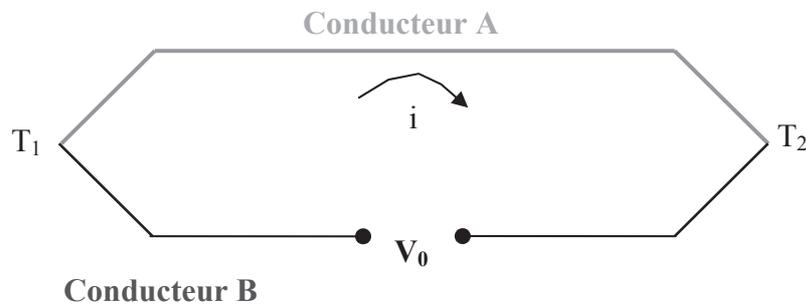
$$S_{A/B}^{T_2 T_1} = (\mathcal{T}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1})$$

Si par convention on choisit pour l'une des températures, T_1 par exemple, une valeur de référence déterminée (généralement 0°C), la f.e.m ne dépend que de la température T_2 , pour un couple de conducteurs A et B donnés.

6.3 PRINCIPES PRATIQUES D'UTILISATION DES THERMOCOUPLES

L'utilisation pratique des thermocouples repose sur les six principes suivants :

1- Un thermocouple doit contenir au moins 2 matériaux et 2 jonctions



La différence de potentiel V_0 est une fonction non linéaire de la différence de températures ($T_1 - T_2$) des deux jonctions :

$$V_0 = e_{B/A} T_1 + e_{A/B} T_2$$

avec :

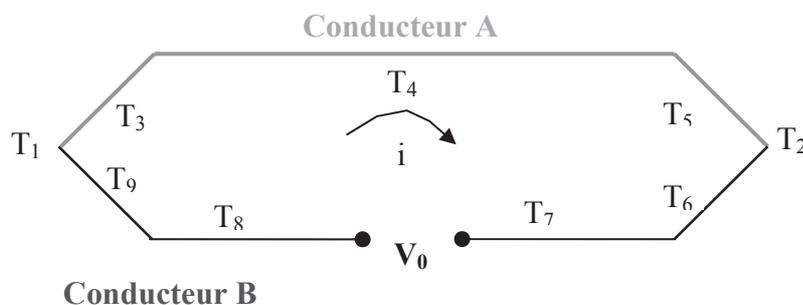
- $e_{B/A}$ le potentiel à la jonction par unité de température à la jonction quand le courant circule de B vers A
- $e_{A/B}$ le potentiel à la jonction par unité de température à la jonction quand le courant circule de A vers B

Etant donné que $e_{A/B} = -e_{B/A}$, on obtient :

$$V_0 = e_{B/A} (T_1 - T_2)$$

Attention : Cette relation n'est pas linéaire, $e_{B/A}$ dépend de la température.

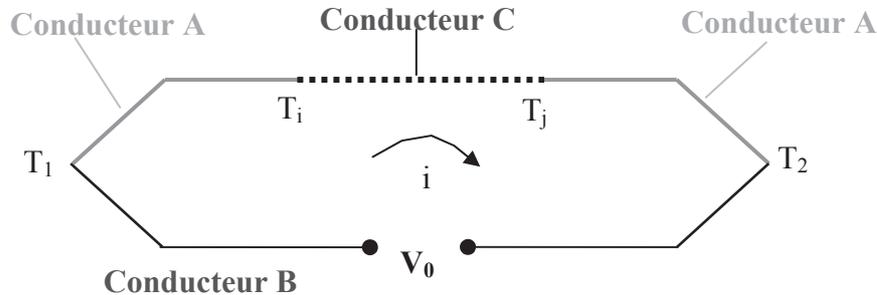
2- V_0 dépend uniquement de la nature des conducteurs A et B et de la différence de température ($T_1 - T_2$) des jonctions.



$$V_0 = f(T_1 - T_2)$$

3- Loi des métaux intermédiaires :

Quand on introduit un 3^{ème} conducteur dans le circuit comprenant le couple A/B, la f.e.m dont le circuit est le siège ne change pas à condition que les extrémités du conducteur ajouté soient à la même température.



En effet :

$$V_0 = e_{B/A} T_1 + e_{A/C} T_1 + e_{C/A} T_2 + e_{A/B} T_2$$

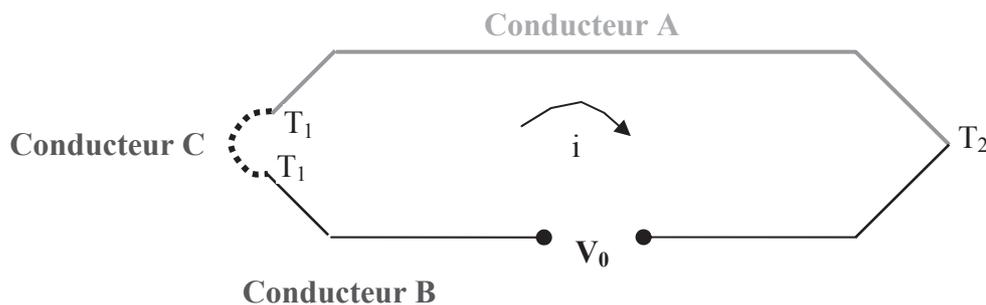
Etant donné que $e_{A/B} = -e_{B/A}$ et $e_{A/C} = -e_{C/A}$, on obtient :

$$V_0 = e_{B/A} (T_1 - T_2) + e_{A/C} (T_1 - T_2)$$

Les effets du conducteur introduit dans le circuit sont donc éliminés si $T_1 = T_2$.

Cette conclusion est valable quel que soit le nombre de conducteurs introduits, à condition que leurs extrémités soient deux à deux à la même température.

4- L'insertion d'un conducteur dans une jonction n'affecte pas V_0 si ses deux extrémités sont maintenues à la température de la jonction.



En effet :

$$V_0 = e_{B/C} T_1 + e_{C/A} T_1 + e_{A/B} T_2, \text{ et compte tenu du fait que } \begin{cases} e_{C/A} = e_{C/B} + e_{B/A} \\ e_{B/A} = e_{B/C} + e_{C/A} \end{cases}$$

$$\text{on obtient : } V_0 = e_{B/A} (T_1 - T_2)$$

Cette conclusion est valable quel que soit le nombre de conducteurs introduits, à condition que leurs extrémités soient deux à deux à la température de la jonction.

5- Loi des températures successives :

Lorsque la température de référence T_1 d'un thermocouple prend une nouvelle valeur T'_1 , la f.e.m de Seebeck du couple A/B passe de la valeur $S_{A/B}^{T_2 T_1}$ à $S_{A/B}^{T_2 T'_1}$:

$$S_{A/B}^{T_2 T'_1} = (\mathcal{T}_B^{T_2 T'_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T'_1}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T'_1})$$

que l'on peut écrire :

$$S_{A/B}^{T_2 T'_1} = (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1}) + (\mathcal{T}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1}) - (P_{A/B}^{T'_1} - P_{A/B}^{T_1}) - (\mathcal{T}_B^{T_1 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_1 T_1})$$

soit : $S_{A/B}^{T_2 T'_1} = S_{A/B}^{T_2 T_1} - S_{A/B}^{T_1 T_1}$, ou encore :

$$S_{A/B}^{T_2 T_1} = S_{A/B}^{T_2 T'_1} + S_{A/B}^{T_1 T_1}$$

Cette relation est utilisée en particulier lorsque la mesure a été faite avec une température de référence T_1 ayant fourni la f.e.m $S_{A/B}^{T_2 T_1}$ et que l'on souhaite connaître la valeur de $S_{A/B}^{T_2 T'_1}$ pour $T_1=0^\circ\text{C}$, afin d'en déduire la température à mesurer T_2 à partir de la table du thermocouple utilisé.

6- Loi des métaux successifs :

Si on considère un premier thermocouple formé des conducteurs A et B, et un deuxième thermocouple formé des conducteurs B et C, les températures des jonctions étant T_1 et T_2 pour les deux conducteurs, nous pouvons en déduire la f.e.m du thermocouple constitué des matériaux A et C:

$$\text{Pour le thermocouple A/B : } S_{A/B}^{T_2 T_1} = (\mathcal{T}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1})$$

$$\text{Pour le thermocouple B/C : } S_{B/C}^{T_2 T_1} = (\mathcal{T}_C^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_B^{T_2 T_1}) + (P_{B/C}^{T_2} - P_{B/C}^{T_1})$$

Pour le thermocouple A/C :

$$S_{A/C}^{T_2 T_1} = (\mathcal{T}_C^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/C}^{T_2} - P_{A/C}^{T_1}) = (\mathcal{T}_C^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1} + \mathcal{T}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_B^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} + P_{B/C}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1} - P_{B/C}^{T_1})$$

$$\text{ce qui nous donne : } S_{A/C}^{T_2 T_1} = (\mathcal{T}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1}) + (\mathcal{T}_C^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_B^{T_2 T_1}) + (P_{B/C}^{T_2} - P_{B/C}^{T_1})$$

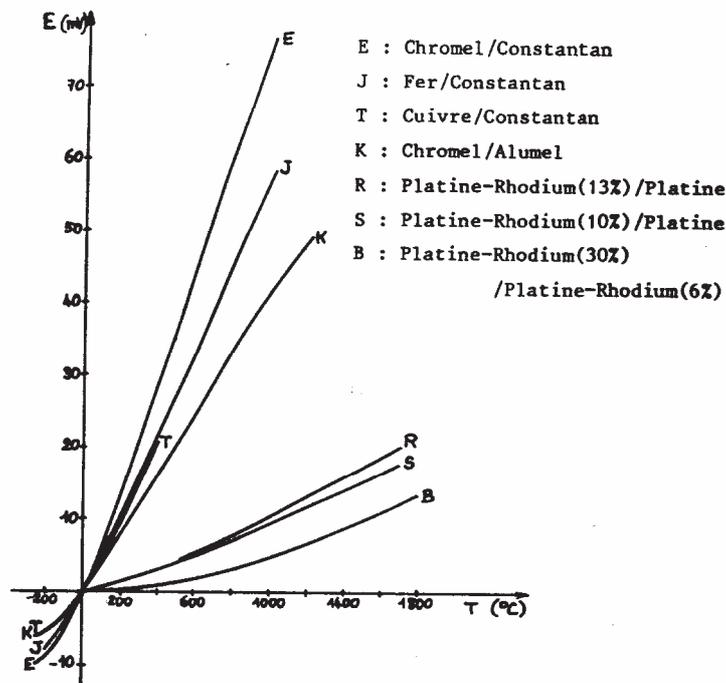
ou encore :

$$S_{A/C}^{T_2 T_1} = S_{A/B}^{T_2 T_1} + S_{B/C}^{T_2 T_1}$$

Sur le plan pratique, si B est un métal de référence (Pb ou Pt) pour lequel il existe différentes tables de thermocouples correspondant à son association avec divers autres conducteurs. La connaissance à partir de ces tables des f.e.m de Seebeck délivrées pour son association avec des conducteurs A et C nous permettra d'en déduire la f.e.m délivrée par le thermocouple A/C dont la table de thermocouple peut ne pas être disponible.

6.4 SENSIBILITE THERMIQUE D' UN THERMOCOUPLE

La f.e.m délivrée par un thermocouple est, sur de grands intervalles de température, une fonction non linéaire de cette dernière. A titre d'exemple, la figure ci-dessous présente la variation de la f.e.m en fonction de la température, pour différents types de thermocouples d'un usage courant. On considère cependant que cette variation est linéaire sur un intervalle restreint de température, dont la taille dépend de la précision recherchée.



La relation qui lie la f.e.m E (en μV) d'un thermocouple à la température T (en $^{\circ}\text{C}$) par une équation polynomiale de la forme :

$$E = \sum_{i=1}^n a_i T^i$$

avec :

- n l'ordre maximal du polynôme (généralement inférieur à 9)
- a_i des coefficients propres au thermocouple considéré.

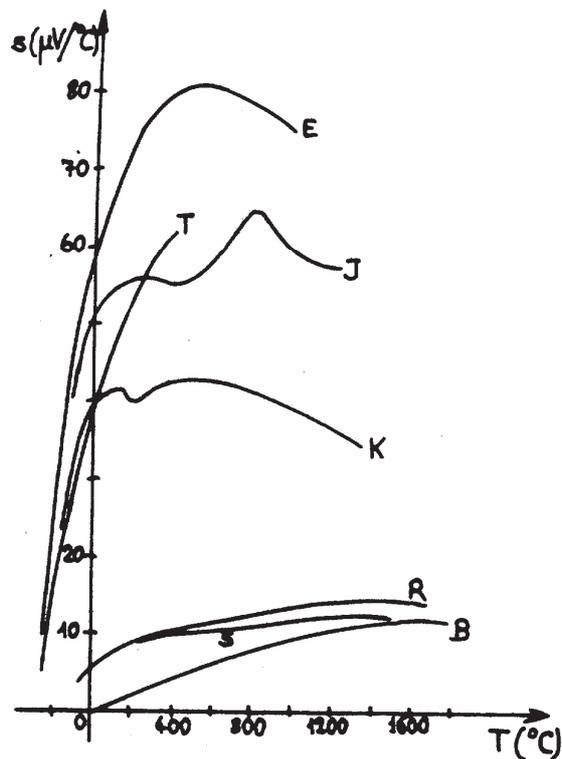
Par exemple, pour le thermocouple type B (Platine-30% Rhodium / Platine-6% Rhodium), $n=8$ et les coefficients a_i sont les suivants :

$$\begin{array}{lll} a_0 = 0 & a_1 = -2.4674601620 \cdot 10^{-1} & a_2 = 5.9102111169 \cdot 10^{-3} \\ a_3 = -1.4307123430 \cdot 10^{-6} & a_4 = 2.1509149750 \cdot 10^{-9} & a_5 = -3.175800720 \cdot 10^{-12} \\ a_6 = 2.4010367459 \cdot 10^{-15} & a_7 = -9.0928148159 \cdot 10^{-19} & a_8 = 1.3299505137 \cdot 10^{-22} \end{array}$$

La sensibilité thermique S (en $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) d'un thermocouple, appelée également pouvoir thermoélectrique, est définie à une température T (pour $T_{\text{ref}} = 0^\circ\text{C}$) par :

$$S(T) = \frac{dS_{A/B}^{T \ 0^\circ\text{C}}}{dT}$$

La figure ci-dessous présente la variation de la sensibilité thermique en fonction de la température, pour les différents thermocouples précédents.



Par exemple, pour le thermocouple type J (Fer/Constantan) $S(0^\circ\text{C}) = 52.9 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ et $S(700^\circ\text{C}) = 63.8 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, tandis que pour le thermocouple type S (Platine-10%Rhodium / Platine) $S(0^\circ\text{C}) = 6.4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ et $S(700^\circ\text{C}) = 11.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

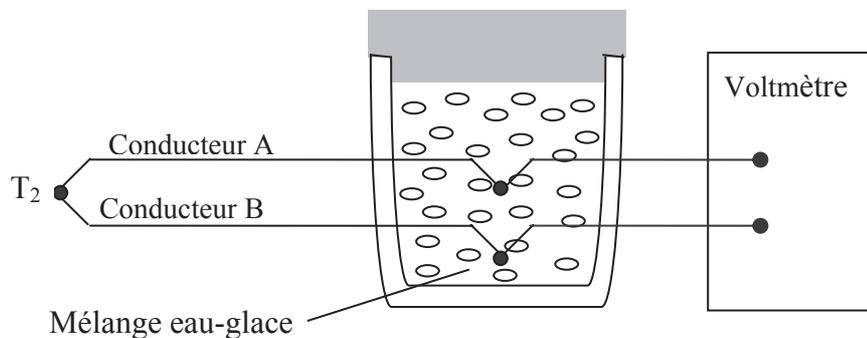
L'ordre de grandeur des sensibilités des thermocouples est très inférieur à celui des capteurs de température utilisant des résistances.

6.5 TEMPERATURE DE REFERENCE D' UN THERMOCOUPLE

La mesure de la température à l'aide d'un thermocouple nécessite que la température de la jonction de référence soit parfaitement connue, en effet toute incertitude sur la valeur de T_{ref} entraîne une incertitude sur la température mesurée. Plusieurs méthodes sont utilisées pour maintenir cette température constante à 0°C

6.5.1 Le bain d'eau et de glace

La jonction de référence est plongée dans un bain constitué d'un mélange eau - glace à pression atmosphérique normale, à l'intérieur d'une enceinte adiabatique. L'eau et la glace doivent être très pures et la glace finement pilée. Cette dernière doit être renouvelée fréquemment pour maintenir une température de référence constante. La température de 0°C est obtenue avec une précision de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.



6.5.2 La méthode du pont électrique

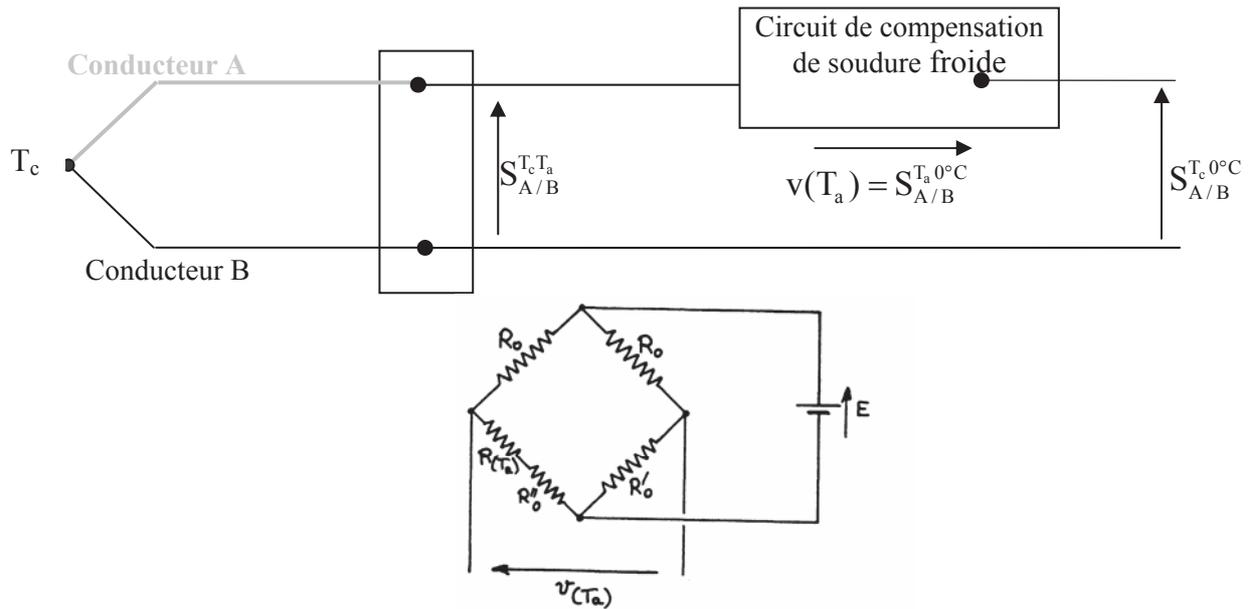
Il est possible de maintenir la température de référence à 0°C par l'intermédiaire de circuits électriques, appelés circuits de correction de la soudure froide.

Si on connaît la température ambiante T_a à l'instant de la mesure, et T_c étant la température à mesurer, on peut écrire :

$$S_{A/B}^{T_c 0^{\circ}\text{C}} = S_{A/B}^{T_c T_a} + S_{A/B}^{T_a 0^{\circ}\text{C}}$$

Le circuit de correction de la soudure froide est tel qu'il délivre automatiquement une tension $v(T_a)$ qui est égale à $S_{A/B}^{T_a 0^{\circ}\text{C}}$. Cette f.e.m, ajoutée à la f.e.m $S_{A/B}^{T_c T_a}$ du thermocouple A/B, permet de mesurer la f.e.m $S_{A/B}^{T_c 0^{\circ}\text{C}}$ aux bornes du circuit de mesure.

La tension $v(T_a)$ est déterminée à partir de la résistance $R(T_a)$ d'un capteur de température à résistance maintenu à température ambiante, le dispositif utilisé est le pont de Wheatstone. Le montage de principe est présenté sur la figure suivante.



Le pont de Wheatstone permet la correction de la 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 $R(T_a)$ du capteur en est une fonction linéaire, dont le coefficient est sa sensibilité thermique α_R .

Le pont est équilibré à 0°C, à la température T_a sa tension de déséquilibre a pour expression :

$$v(T_a) = E \frac{R_0 (R_0' - R_0'')}{(R_0 + R_0')^2} \alpha_R T_a$$

Les valeurs numériques des composants du pont sont choisies de manière à assurer :

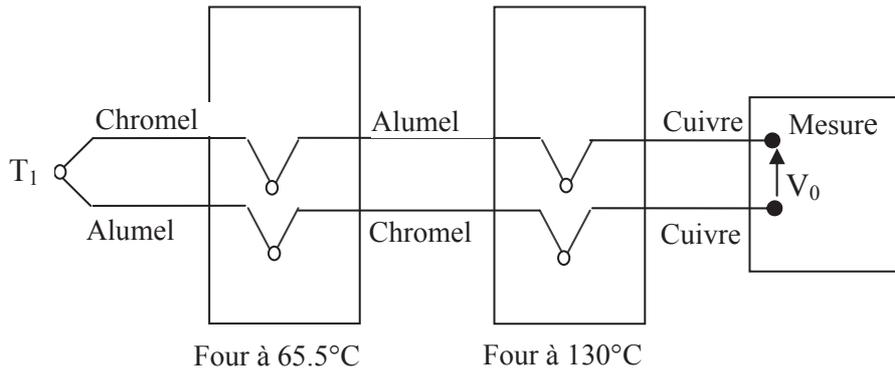
$$E \frac{R_0 (R_0' - R_0'')}{(R_0 + R_0')^2} \alpha_R T_a = S_{A/B}^{T_a 0^\circ C}$$

En supposant que la sensibilité du thermocouple est constante dans la plage de variation de T_a on obtient :

$$S = E \frac{R_0 (R_0' - R_0'')}{(R_0 + R_0')^2} \alpha_R$$

6.5.3 La méthode du double four

Cette méthode utilise deux fours à des températures différentes pour simuler la température de référence de 0°C.



On a :

$$V_0 = e_{\text{Cuivre/Alumel}} \cdot 130 + e_{\text{Alumel/Chromel}} \cdot 65,5 + e_{\text{Chromel/Alumel}} \cdot T_1 + e_{\text{Alumel/Chromel}} \cdot 65,5 + e_{\text{Chromel/Cuivre}} \cdot 130$$

$$= 2e_{\text{Alumel/Chromel}} \cdot 65,5 + e_{\text{Chromel/Alumel}} \cdot 130 + e_{\text{Chromel/Alumel}} \cdot T_1 = e_{\text{Chromel/Alumel}} (T_1 - 0^\circ\text{C})$$

On se ramène ainsi à un couple Chromel/Alumel dont la jonction froide est à 0°C.

6.6 PRINCIPAUX TYPES DE THERMOCOUPLES ET LIMITES D'EMPLOI

Le tableau suivant présente, pour différents types de thermocouples, les températures d'utilisation ainsi que la précision, pour les diamètres indiqués. Des tables donnant la f.e.m de ces thermocouples en fonction de la température figurent en annexe.

Thermocouples	Gamme de Températures	f.e.m (mV)	Précision
Cuivre / Constantan Type T (diamètre 1.63 mm)	-270 à 370°C	-6.258 à 19.027	± 2% de -100°C à -40°C ± 0.8% de -40°C à 100°C ± 0.75% de 100°C à 350°C
Fer / Constantan Type J (diamètre 3.25 mm)	-210 à 800°C	-8.096 à 45.498	± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 800°C
Chromel / Alumel Type K (diamètre 3.25 mm)	-270 à 1250°C	-5.354 à 50.633	± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 1250°C
Chromel / Constantan Type E (diamètre 3.25 mm)	-270 à 870°C	-9.835 à 66.473	± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 1250°C
Platine-Rhodium (10%) / Platine Type S (diamètre 0.51 mm)	-50 à 1500°C	-0.236 à 15.576	± 2.5°C de 0°C à 600°C ± 0.4% de 600°C à 1600°C
Platine-Rhodium (13%) / Platine Type R (diamètre 0.51 mm)	-50 à 1500°C	-0.226 à 17.445	± 1.4°C de 0°C à 538°C ± 0.25% de 538°C à 1500°C
Platine-Rhodium (30%) / Platine-Rhodium (6%) Type B (diamètre 0.51 mm)	0 à 2760°C	0 à 12.426	± 0.5% de 870°C à 1700°C

6.7 COMPARAISON THERMOCOUPLE/THERMOMETRES ELECTRIQUES

Le tableau suivant récapitule les principaux avantages et inconvénients des thermocouples, des capteurs de température à résistance et des thermistances.

	THERMOCOUPLE	RTD	THERMISTANCE
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ✓ simple ✓ robuste ✓ peu coûteux ✓ mesures ponctuelles ✓ rapide ✓ gamme de températures large 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ très stable ✓ très précis ✓ meilleure linéarité que le thermocouple 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ très sensible ✓ faible encombrement
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ✓ non linéaire ✓ stabilité faible ✓ sensibilité faible ✓ nécessite une température de référence 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ coûteux ✓ lent ✓ sensibilité faible ✓ erreurs par auto-échauffement (effet Joule) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ non linéaire ✓ gamme réduite de températures ✓ stabilité faible ✓ fragile ✓ auto-échauffement