

Mesure de température par contact

LES CAPTEURS DE TEMPERATURE

INTRODUCTION

- Dans l'industrie, **la température est la grandeur physique que l'on mesure le plus souvent**. La température est un paramètre de **contrôle** et un **indicateur** permettant, soit de diriger, soit de suivre de nombreux processus.
- La température fait intervenir divers phénomènes physiques, le point triple de l'eau (273.16K, 6.11 mbar), l'énergie thermique minimale (0K).
- **La température n'est pas directement accessible**, contrairement à la masse ou à la longueur. **Elle est donc repérable** par l'intermédiaire d'un phénomène associé.

Pour déterminer la température d'un milieu avec un maximum de précautions, on doit se poser les questions suivantes :

- *quel est la nature de ce milieu ? est-il accessible ?*
- *quel est l'état thermique de ce milieu ? quelle est son interaction avec son environnement ?*
- *quel instrument de mesure utiliser ? pour quelle plage de température ?*
- *quelle est la méthode à adopter ?*
- *où placer le capteur ? et comment ?*
- *quelle est l'écart entre sa température vraie et la température mesurée ?*

La température est une grandeur physique caractérisant une sensation de chaleur ou de froid. Cette grandeur est proportionnelle au niveau énergétique du corps considéré, et représentative de son agitation moléculaire.

La température d'un corps s'exprime en degrés Celsius ou en degrés Kelvin (si l'on se réfère à l'état de repos - zéro absolu - de ses molécules).

Il existe deux méthodes pour déterminer la température d'un corps :
la mesure au **contact** de ce corps , et le mesure de son **rayonnement**.

En fait, quel que soit le moyen utilisé, le mesure de la température d'un corps résulte d'une action **indirecte** consistant à traduire l'état d'une grandeur physique intermédiaire influencée par le corps (évaluation de la dilatation d'un liquide, d'un solide, d'un flux de rayonnement, variation de résistance électrique) en valeur chiffrée et exprimée en degrés Celsius ou en Kelvin.

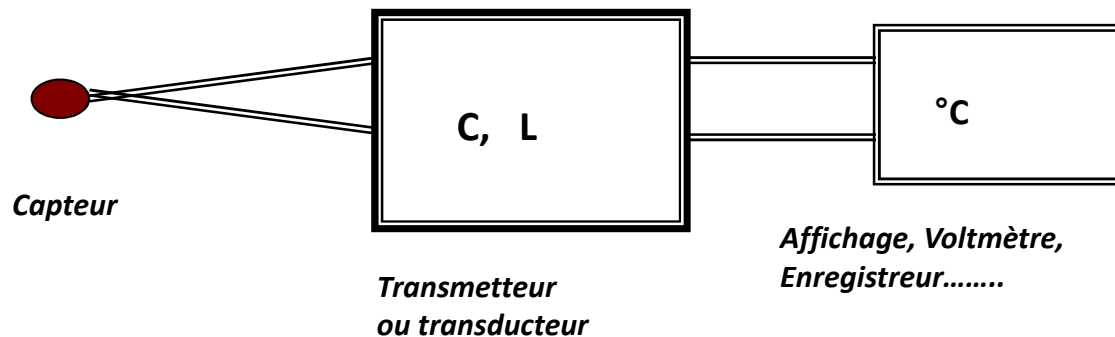
Ainsi, déterminer des températures par thermographie infrarouge consiste à **mesurer des flux de rayonnements**, puis traduire ces résultats en valeurs exploitables exprimées dans l'unité choisie par l'opérateur.

Évidemment, l'environnement extérieur et les imperfections des radiomètres sur les plans optiques, électrique, etc.. influencent les valeurs de sortie de l'appareil utilisé : Il est toujours intéressant de connaître les **limites d'un système, et de savoir interpréter ses résultats**.

CHAÎNE DE MESURE :

Elle est constituée essentiellement des éléments suivants :

- **le capteur** (organe de détection) . Il transforme l'énergie thermique puisée au sein du milieu étudié en énergie électrique ou mécanique,
- **La chaîne de transmission** (transmetteur ou transducteur). Il conditionne et amplifie le signal .
- **l'instrument de mesure** (organe de lecture ou d'enregistrement) : voltmètre, Ohmmètre, Ampèremètre, afficheur, enregistreur.



- CHOIX DE LA MÉTHODE EN FONCTION DU DOMAINE DE TEMPÉRATURE :

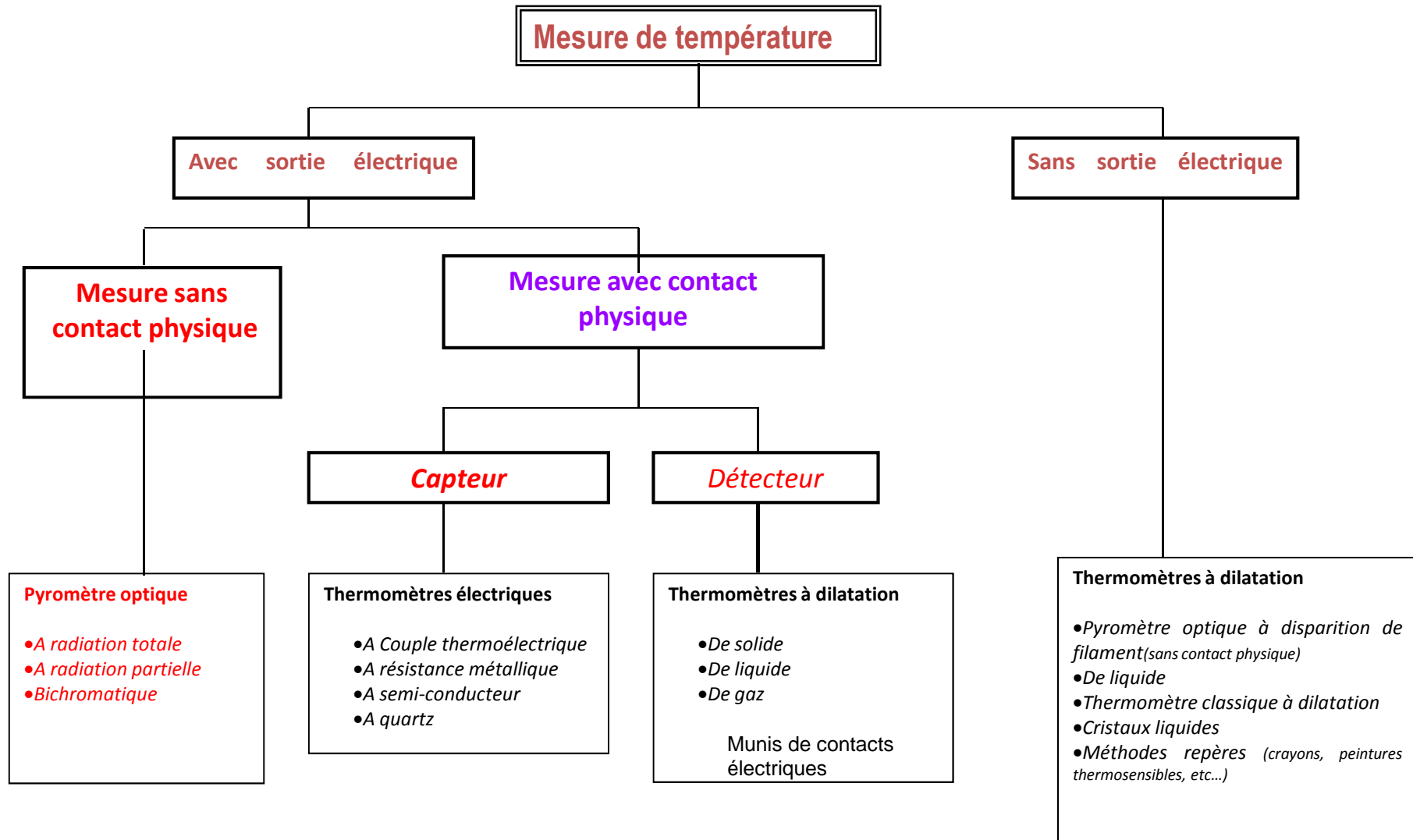
Le choix du capteur à utiliser est très influencé par l'ordre de grandeur des températures à mesurer. Le choix de la chaîne de mesure est lié à l'intervalle exploré autour de la valeur moyenne.

- On tiendra compte dans ce choix de :

- La sensibilité,
- La fidélité,
- l'exactitude,
- Du temps de réponse

Et ce, en fonction du souhait de l'opérateur.

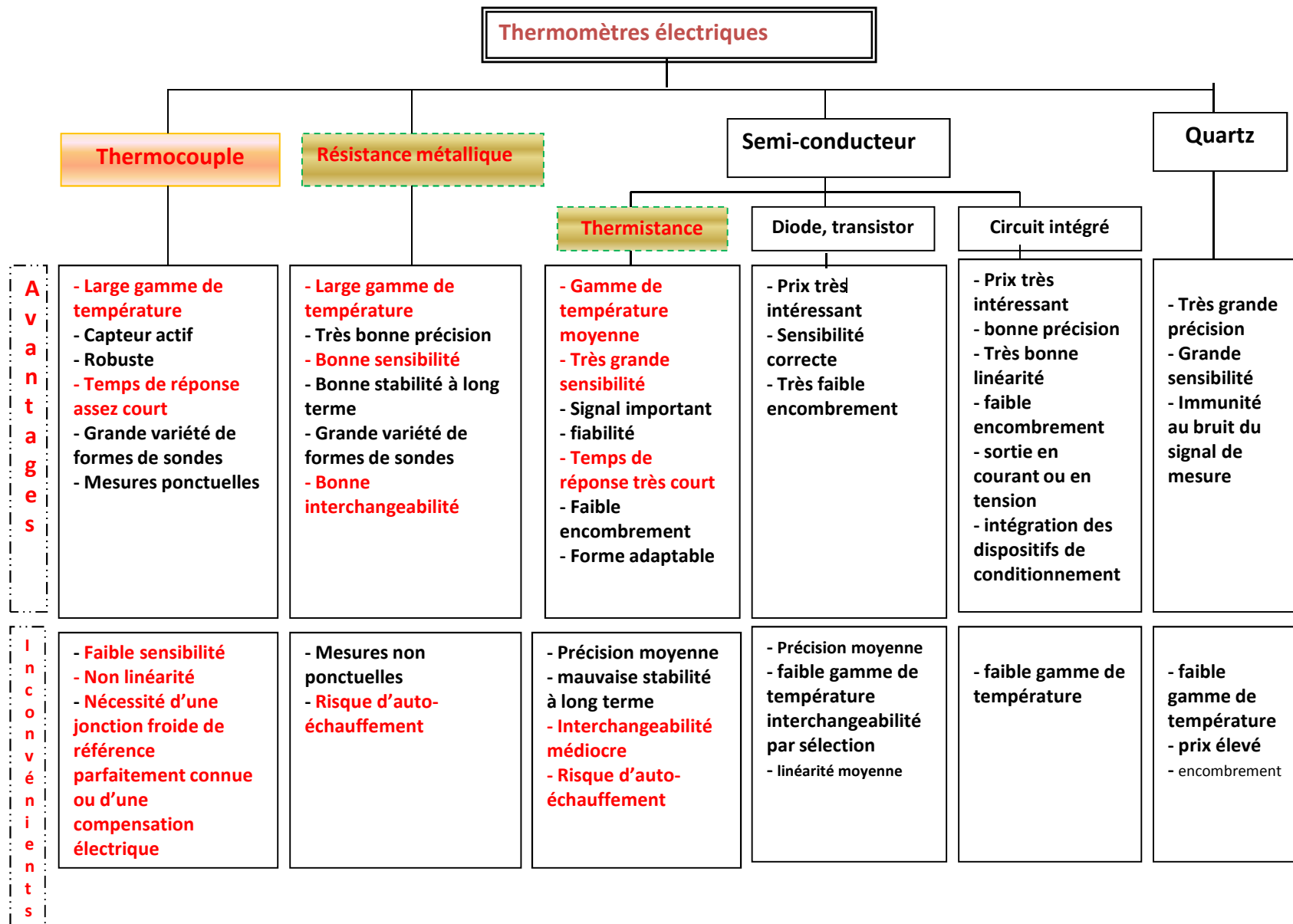
CHOIX D'UN CAPTEUR



GAMME DE TEMPERATURE DES PRINCIPAUX THERMOMETRES

Type	Gamme de température									
	-300	0	1000	2000	3000					
<i>Thermocouple</i>										
<i>Résistance métallique</i>										
<i>Thermistance</i>										
<i>Transistor</i>										
<i>Circuit intégré</i>										
<i>Quartz</i>										
<i>Pyromètre optique</i>										
<i>Pyromètre à dilatation de solide</i>										
<i>Pyromètre à dilatation de liquide</i>										
<i>Thermomètre à dilatation de gaz</i>										
<i>Thermomètre à tension de de vapeur</i>										
<i>Cristaux liquides</i>										
<i>Méthodes repères</i>										

CHOIX D'UN THERMOMETRE ELECTRIQUE



PRINCIPE DE MESURE

On distingue des dispositifs basés sur :

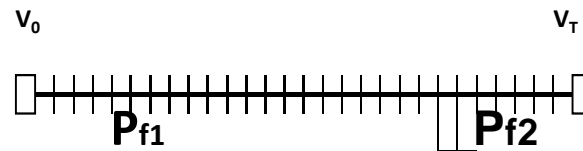
1/ les propriétés thermiques des solides et des fluides :

- Dilatation : des liquides, des solides et des gaz,
- Tension de vapeur des liquides.
- Autres

2/ les propriétés thermoélectriques :

- Variation de la résistance d'un conducteur avec la température: sonde platine, thermistances,
- Thermoélectricité (thermocouples).

Echelle de température



P_{f1} : point fixe correspondant à un état physique d'un corps donné.
Ex : fusion de la glace (0°C)

P_{f2} : point fixe correspondant à un état physique d'un corps donné.
Ex : ébullition de l'eau (100°C)

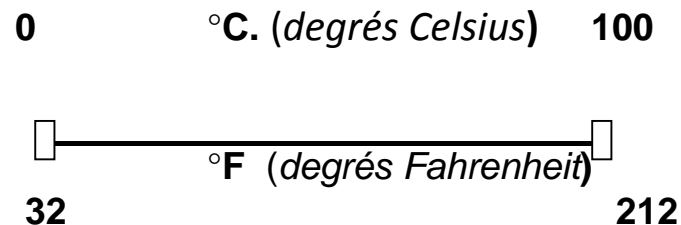
On définit alors une échelle de température fondée sur 2 points fixes :

Une relation arbitraire entre le nombre T qui relie la température et le nombre X qui mesure la grandeur utilisée, soit :

$$T(X) = A.X + B \quad T(X) : \text{fonction thermométrique}$$

D'où une échelle centésimale ou Celsius : échelle la plus utilisée.

Autre échelles :



$$\text{Soit : } 1^{\circ}\text{C} = 180/100 \text{ } ^{\circ}\text{F} = 9/5 \text{ } ^{\circ}\text{F}$$

$$\begin{aligned} \text{Conversion : } T \text{ } ^{\circ}\text{F} &= 9/5 \text{ } T^{\circ}\text{C} + 32 \\ T^{\circ}\text{C} &= 5/9 (T \text{ } ^{\circ}\text{F} - 32). \end{aligned}$$

Dans ce cas, la fonction thermométrique peut s'écrire :

$$T(X) = 100. \frac{X - X_0}{X_{100} - X_0}$$

d'où :

$$X = X_0. (1 + \alpha.T)$$

Remarques :

La grandeur physique qui sert à mesurer la température varie rarement de façon linéaire avec elle.

Un accord international a fixé l'échelle de température E.I.T qui s'appuie sur 18 points fixes (pour lesquels la température thermodynamique a été déterminée) et deux instruments d'interpolation.

En France, la conservation de l'E.I.T a été confiée par le BNM (Bureau National de Métrologie) à l'INM (Institut National de Métrologie), laboratoire primaire .

POINTS FIXES SELON E.I.T 90

Il existe une liste de points fixes primaires et de nombreux points fixes secondaires. Trois points fixes sont définis par une équation d'influence de la pression.

Points fixes primaires	Température (°C)
Pression de vapeur saturante entre 3 et 5K de 4He	<i>par équation</i>
Point triple de H ₂ en équilibre	-259.3467
Pression de vapeur de l'hydrogène H ₂ vers 17K	<i>par équation</i>
Pression de vapeur de l'hydrogène H ₂ vers 20,3K	<i>par équation</i>
Point triple du néon Né	-248.5939
Point triple de l'oxygène O ₂	-218.7916
Point triple de l'argon Ar	-189.3442
Point triple du mercure Hg	-38.8344
Point triple de l'eau pure H ₂ O	0.0100
Fusion du gallium Ga	29.7646
Congélation de l'indium In	156.5985
Congélation de l'étain Sn	231.9280
Congélation du zinc Zn	419.5270
Congélation de l'aluminium Al	660.3230
Congélation de l'argent Ag	961.7800
Congélation de l'or Au	1064.1800
Congélation du cuivre Cu	1084.6200

Quelques points fixes secondaires	Température (°C)
Sublimation de l'anhydride carbonique CO	-78.464
Congélation du bismuth	271.403
Congélation du plomb Pb	327.462
Congélation du nickel Ni	1455
Congélation du platine Pt	1768
Congélation du rhénium Rh	1962
Fusion du molybdène Mo	2622
Fusion du tungstène W	3420

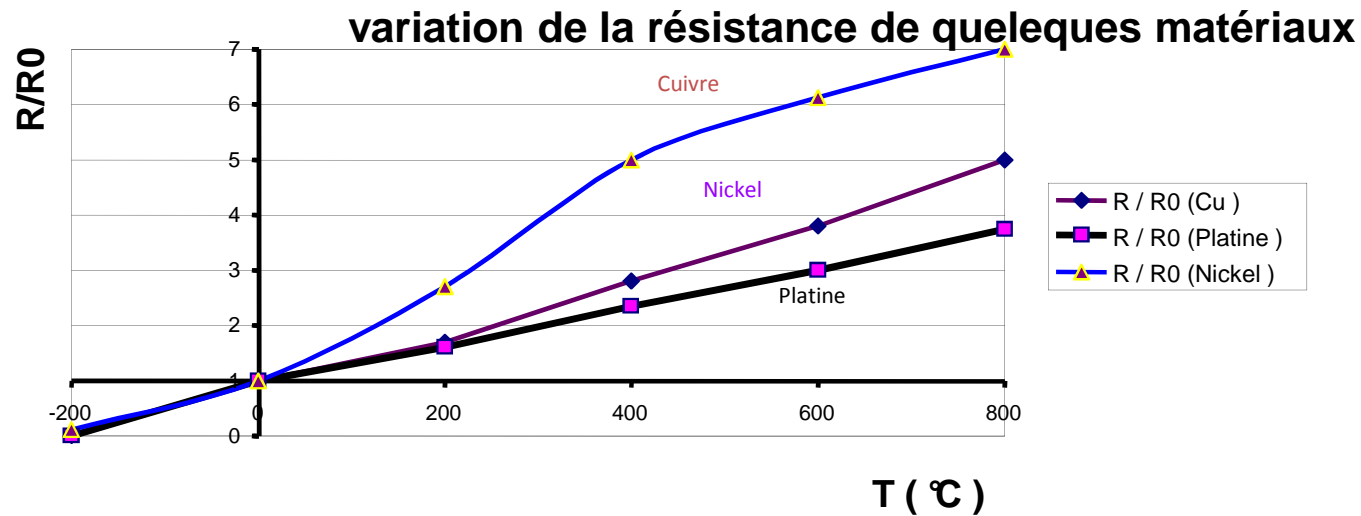
- THERMOMETRES UTILISANT LES PROPRIETES THERMOELECTRIQUES

1/ Thermomètres a résistance :

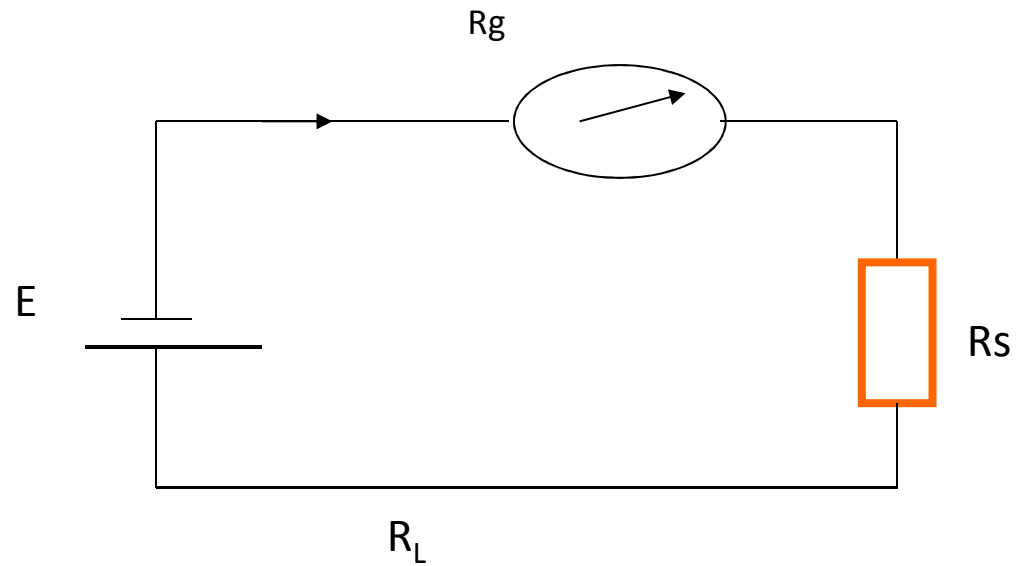
- la variation de la résistance d'un métal avec la température s'écrit :

$$R_T = R_0(1 + \alpha \cdot \theta)$$

- Variation de la résistance de quelques matériaux en fonction de la température



Principe :



Courant de circulation :

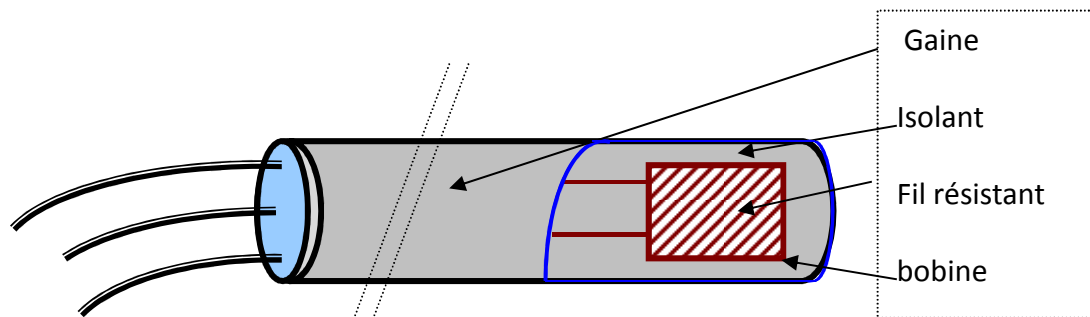
$$i = \frac{E}{r + R_L + R_g + R_s} . (mA)$$

- si R_s varie, i varie,
- G est gradué en $^{\circ}\text{C}$.

Remarque : en réalité, R_g et R_s varient avec la température, donc i varie.

- **Constitution d'une sonde résistive :**

Schéma de principe.



- **Métaux utilisés :**

-

- Nickel $T \rightarrow 150\text{ °C}$

- Cuivre $T \rightarrow 200\text{ °C}$

- **Platine** $T \rightarrow 1000\text{ °C}$

- Le métal le plus utilisé pour réaliser des capteurs de température est le platine. Il supporte des températures jusqu'à 1700 °C, **sans s'oxyder ni s'évaporer, résistant à la corrosion et de caractéristiques électriques stables.**
- Les dimensions des capteurs cylindriques sont de 1 à 2 mm de diamètre, de 6 à 15 mm de longueur.
- Il peut être obtenu très pur, ce qui garantit **l'interchangeabilité des sondes.**
- Plus un métal est pur, plus son coefficient de dilatation α est élevé, ce qui permet de sélectionner les capteurs.
- Le platine est utilisé quand on cherche une bonne précision.
- Il est reconnu comme **instrument d'interpolation entre 13.81K (point triple de l'hydrogène) et 903.89 K (point de solidification de l'antimoine) pour définir l'E.I.T 90. La précision obtenue de l'ordre du mK dans le domaine des températures usuelles.**
- Pour les thermomètres industriels, les exigences sont moins rigoureuses.
- La norme NF C-42.330 (1983), qui reprend la norme internationale CEI 751 (1983), pour la plage -200 à 850 °C, utilise la relation :
- **$RT = R0 [1 + aT + bT^2 + cT^3 (T - 100)]]$ avec T en °C Relation de Callendar**

- Les constantes peuvent être déterminées à l'aide des points fixes suivants :
 - Ebullition normale de l'oxygène : 90 K
 - Point glace : 273,15 K
 - Point vapeur : 373,15 K
 - Ebullition normale du soufre : 717,15 K
- Pour plus de détails, se reporter à l'annexe B (relation résistance – température)

Remarques

- a/ *les valeurs de b et c dans la relation de Callendar restent faibles, on peut alors considérer une **variation linéaire de R(T) pour une plage de température pas trop grande (0 à 100 °C).***
- b/ Le niveau de sortie est relativement faible.
 Pour $i=1$ mA, $R(\text{capteur})=100\Omega$; la tension de sortie n'est que de 0.4 mV par degré, mais la reproductibilité est excellente.
 Par conséquent, le platine est utilisable dans des applications où l'on cherche une grande précision (erreurs inférieures au 1/100 °C).
- c/ Les thermomètres doivent avoir un coefficient α de $3.805 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ et une résistance R_0 de 100Ω .
- *La norme accepte deux classes d'interchangeabilité, dont les tolérances sont données dans le tableau ci-après.*
- *On peut ainsi obtenir une reproductibilité meilleure que 0.1 °C si les conditions d'utilisation sont respectées, en particulier si l'on ne dépasse pas les limites d'utilisation en température indiquées par le constructeur.*

- *On peut ainsi obtenir une reproductibilité meilleure que 0.1 °C si les conditions d'utilisation sont respectées, en particulier si l'on ne dépasse pas les limites d'utilisation en température indiquées par le constructeur.*

Avantages

- **Grande précision**
- **Grande sensibilité**
- **Bonne stabilité (1 °C à 600 °C pour 6000 h d'utilisation)**
- **Interchangeabilité**
- **Pas d'influence des champs magnétiques**
- **Mesures simples sans corrections**

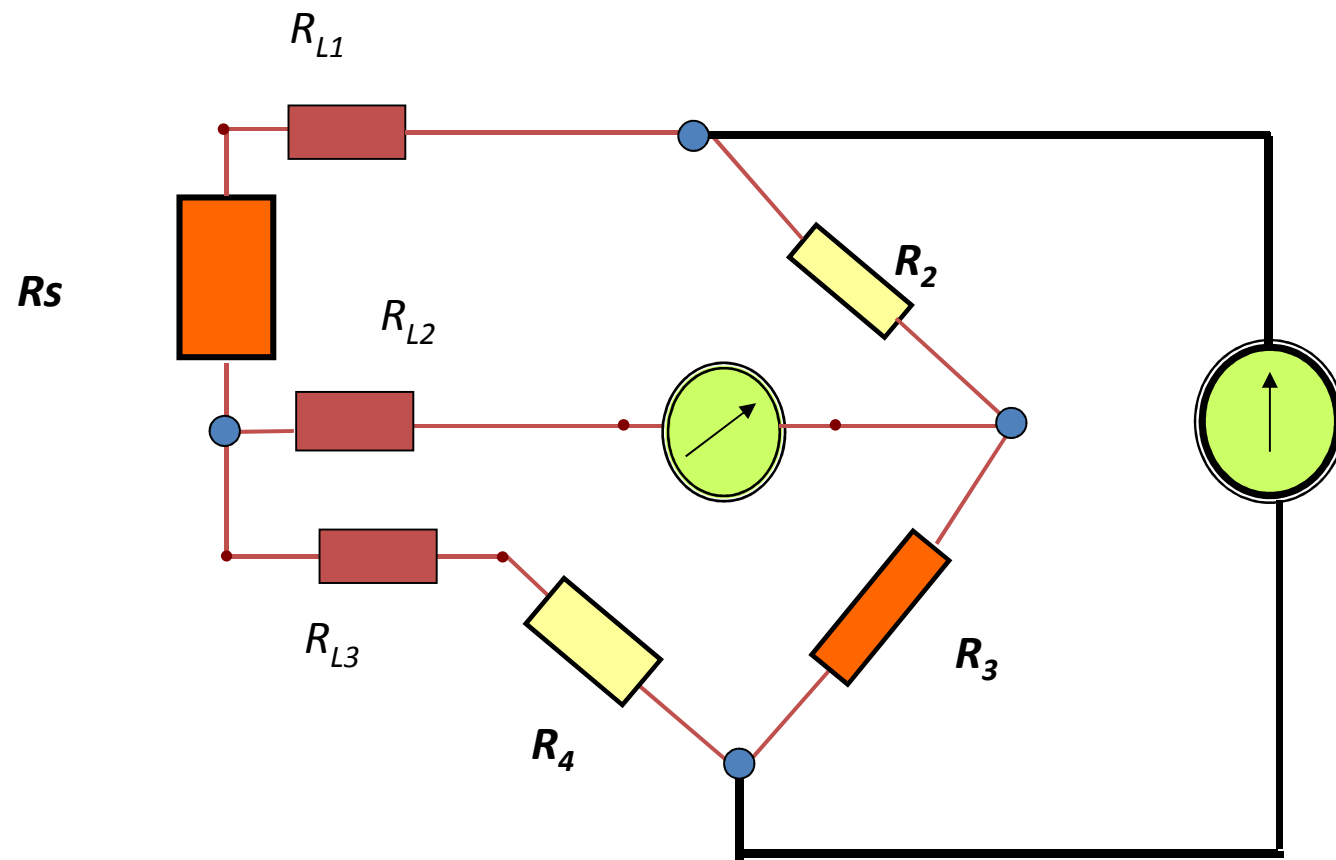
Inconvénients

- Mesures différentielles difficiles
- Courant de mesure limité à 1 ou 2 mA (voir auto échauffement)
- Encombrement important pour certains capteurs

- Le coefficient α est défini par la relation :

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100.R_0} = a + 100.b$$

- Ces sondes sont utilisables de -250 à 1000 °C mais l'enveloppe de verre limite pratiquement à 630 °C. au delà de 250 °C on préfère souvent les thermocouples.
- La sensibilité est de $0.4 \Omega / ^\circ\text{C}$ pour $R_0 = 100 \Omega$
- ***Le temps de réponse varie de 0.1 à 10 s suivant l'enrobage (céramique, alumine ,verre ou matières plastiques)***



- La sensibilité relative est donnée par :

$$a = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$$

Auto-échauffement :

La mesure de la résistance R_s de la sonde thermométrique nécessite le passage d'un courant électrique I ; d'où son échauffement par effet Joule qui délivre une énergie proportionnelle au temps d'utilisation t , telle que :

$$E = R_s \cdot I^2 \cdot t$$

Ce qui accroît légèrement la température de la résistance (et du doigt de gant).
On mesure donc une température par excès.

Les constructeurs proposent des récepteurs qui débitent un courant électrique pouvant varier entre 0.1 et 1 mA.

- L'élévation de température par effet Joule se situera par conséquent entre 0.1 et 1 °C/mW.
- On définit ainsi un coefficient d'auto échauffement de la sonde thermométrique par la grandeur :

$$K = \frac{\textit{puissance}}{\textit{delta.T}} \quad K \text{ en } \text{mW/degré.}$$

- On obtient ainsi une erreur de 0.05 à 1.5 °C.
- En pratique, on choisit un courant de mesure < 3 mA.

Remarques :

- 1/ Il existe des résistances dont les valeurs nominales peuvent être 50, 200 ou 500 Ω
- 2/ Des résistances en nickel (fils, lames ou couches minces) sont utilisées dans certaines applications.

Elles sont économiques avec un coefficient de température plus élevé que celui du platine ($6.18.10^{-3}$ au lieu de 4.10^{-3}) mais utilisables seulement entre -60 et +180 °C.

RELATION RESISTANCE TEMPERATURE

*Résistance thermométrique Platine 100 Ohm à 0°C
Selon NFC-42-330*

Symbole (non standard) : Pt 100

Valeur à 0 °C : 100 Ω

Coefficient de température moyen entre 0 et 100 °C :

$$\alpha = 0.00385 / ^\circ\text{C}$$

Plage d'utilisation : -200 à +850 °C

Classe de précision :

Classe A $\pm [0.15 ^\circ\text{C} + 0.002 \cdot T (^\circ\text{C})]$

Classe B $\pm [0.30 ^\circ\text{C} + 0.005 \cdot T (^\circ\text{C})]$

Polynôme d'interpolation :

On utilise la relation de Callendar et Van-Dussen de forme générale :

$$R(T) = R(0^\circ\text{C}) [1 + \alpha (T - \delta(T-100))T \cdot 10^4 - \beta(T - 100)^3 \cdot 10^{-8}]$$

Soit

$$R(T) = R(0^\circ\text{C}) [1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C (T - 100)^3]$$

De 0°C à +850 °C :

$$\alpha = 0.00385$$

$$\beta = 0$$

$$\delta = 1.507$$

$$A = 3.90802 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5.80195 \cdot 10^{-7}$$

$$C = 0$$

donc Dans cette zone, $R(T)$ est un polynôme du deuxième degré.

1.7 – Thermomètre à résistance métallique

1.7.1 – Résistance d'une sonde métallique Platine thermométrique PT 100 fonction de la température d'après la norme NF C 42-330

°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω
-200	18,49	70	127,07	340	226,17	610	316,80
-190	22,80	80	130,89	350	229,67	620	319,99
-180	27,08	90	134,70	360	233,17	630	323,18
-170	31,32			370	236,65	640	326,35
-160	35,53	100	138,50	380	240,13		
		110	142,29	390	243,59	650	329,51
-150	39,71	120	146,06			660	332,66
-140	43,87	130	149,82	400	247,04	670	335,79
-130	48,00	140	153,58	410	250,48	680	338,92
-120	52,11			420	253,90	690	342,03
-110	56,19	150	157,31	430	257,32		
		160	161,04	440	260,72	700	345,13
-100	60,25	170	164,76			710	348,22
- 90	64,30	180	168,46	450	264,11	720	351,30
- 80	68,33	190	172,16	460	267,49	730	354,37
- 70	72,33			470	270,86	740	357,42
- 60	76,33	200	175,84	480	274,22		
		210	179,51	490	277,56	750	360,47
- 50	80,31	220	183,17			760	363,50
- 40	84,27	230	186,82	500	280,90	770	366,52
- 30	88,22	240	190,45	510	284,22	780	369,53
- 20	92,16			520	287,53	790	372,52
- 10	96,09	250	194,07	530	290,83		
		260	197,69	540	294,11	800	375,51
0	100,00	270	201,29			810	378,48
10	103,90	280	204,88	550	297,39	820	381,45
20	107,79	290	208,45	560	300,65	830	384,40
30	111,67			570	303,91	840	387,34
40	115,54	300	212,02	580	307,15		
		310	215,57	590	310,38	850	390,26
50	119,40	320	219,12				
60	123,24	330	222,65	600	313,59		

Classe de précision

Tolérance sur la température

A

$0,15 + 0,002 \cdot |T(^{\circ}\text{C})|$

B

$0,30 + 0,005 \cdot |T(^{\circ}\text{C})|$

Ecart admissible par rapport aux valeurs nominales

T °C	-200	-100	0	100	200	300	400	500	600	700	800	850
Classe A												
Ecart en ±Ω	0,24	0,14	0,06	0,13	0,20	0,27	0,33	0,38	0,43			
en ±°C	0,55	0,35	0,15	0,35	0,55	0,75	0,95	1,15	1,35			
Classe B												
Ecart en ±Ω	0,56	0,32	0,12	0,30	0,48	0,64	0,79	0,93	1,06	1,17	1,28	1,34
en ±°C	1,3	0,8	0,3	0,8	1,3	1,8	2,3	2,8	3,3	3,8	4,3	4,6

RELATION RESISTANCE TEMPERATURE
--

*Résistance thermométrique Platine 100 Ω à 0°C
Selon NFC-42-330*

Symbole (non standard) : Pt 100

Valeur à 0 °C : 100 Ω

Coefficient de température moyen entre 0 et 100 °C :

$$\alpha_0^{100} = 0.00385 / ^\circ\text{C}$$

Plage d'utilisation : -200 à +850 °C

Classe de précision	Classe A $\pm [0,15 ^\circ\text{C} + 0,002 \cdot T (^\circ\text{C})]$
	Classe B $\pm [0,30 ^\circ\text{C} + 0,005 \cdot T (^\circ\text{C})]$

Polynôme d'interpolation :

On utilise la relation de Callendar et Van-Dussen de forme générale :

$$R(T) = R(0^\circ\text{C}) [1 + \alpha (T - \delta(T-100))T \cdot 10^{-4} - \beta (T - 100)^3 \cdot 10^{-8}]$$

Soit

$$R(T) = R(0^\circ\text{C}) [1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C (T - 100)T^3]$$

De 0°C à +850 °C :

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,00385 \\ \beta &= 0 \\ \delta &= 1,507 \end{aligned}$$

donc

$$\begin{aligned} A &= 3,90802 \cdot 10^{-3} \\ B &= -5,80195 \cdot 10^{-7} \\ C &= 0 \end{aligned}$$

Dans cette zone, R(T) est un polynôme du deuxième degré.

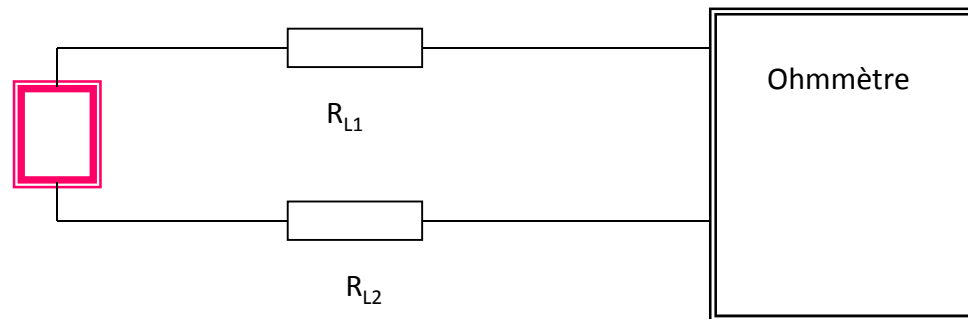
MESURE DES VALEURS DE RÉSISTANCE

Méthodes de mesure :

On distingue deux grandes catégories :

- *les méthodes potentiométriques* : aucun courant ne passe à l'équilibre dans la branche du circuit au moment de la mesure. Elles tendent à être remplacées par l'utilisation des appareils numériques(mise en œuvre simple)
- *Les méthodes en pont* : le courant passe dans tous les éléments du circuit pendant la mesure. Ce courant tend à être presque négligeable.

- **MONTAGE SIMPLE À DEUX FILS**



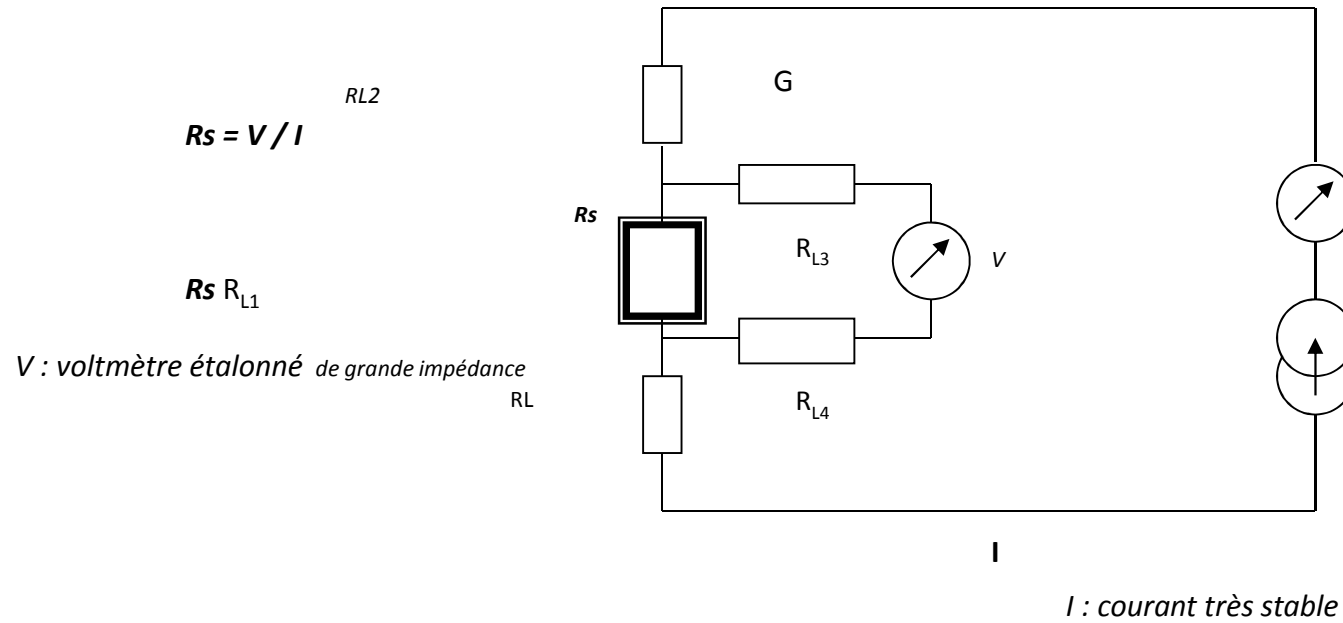
*La résistance mesurée est : **$R = R_s + R_{L1} + R_{L2}$**
D'où une erreur sur la valeur de la résistance mesurée.*

Exemple : avec deux câbles de 0.5Ω et une sonde platine de 100Ω On a $R_s = 101 \Omega$, soit une erreur systématique de 2.5°C

Ce montage est déconseillé si le capteur est très éloigné de l'appareil de mesure.

- **MONTAGE SIMPLE À QUATRE FILS**

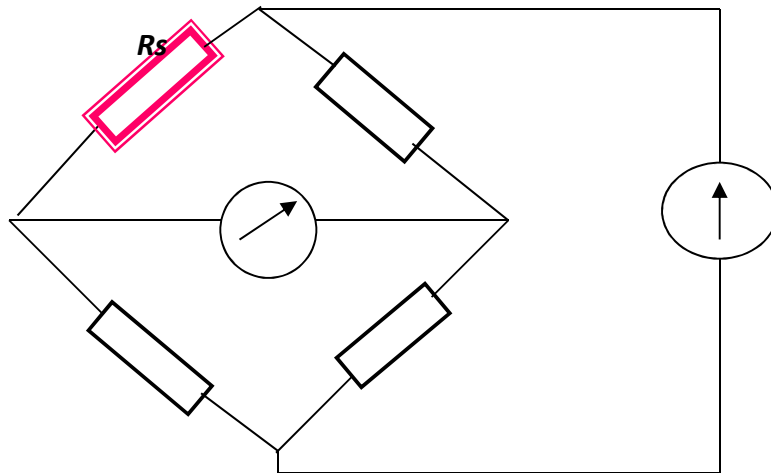
A/ montage directe



MONTAGES UTILISANT UN PONT DE WHEATSTONE

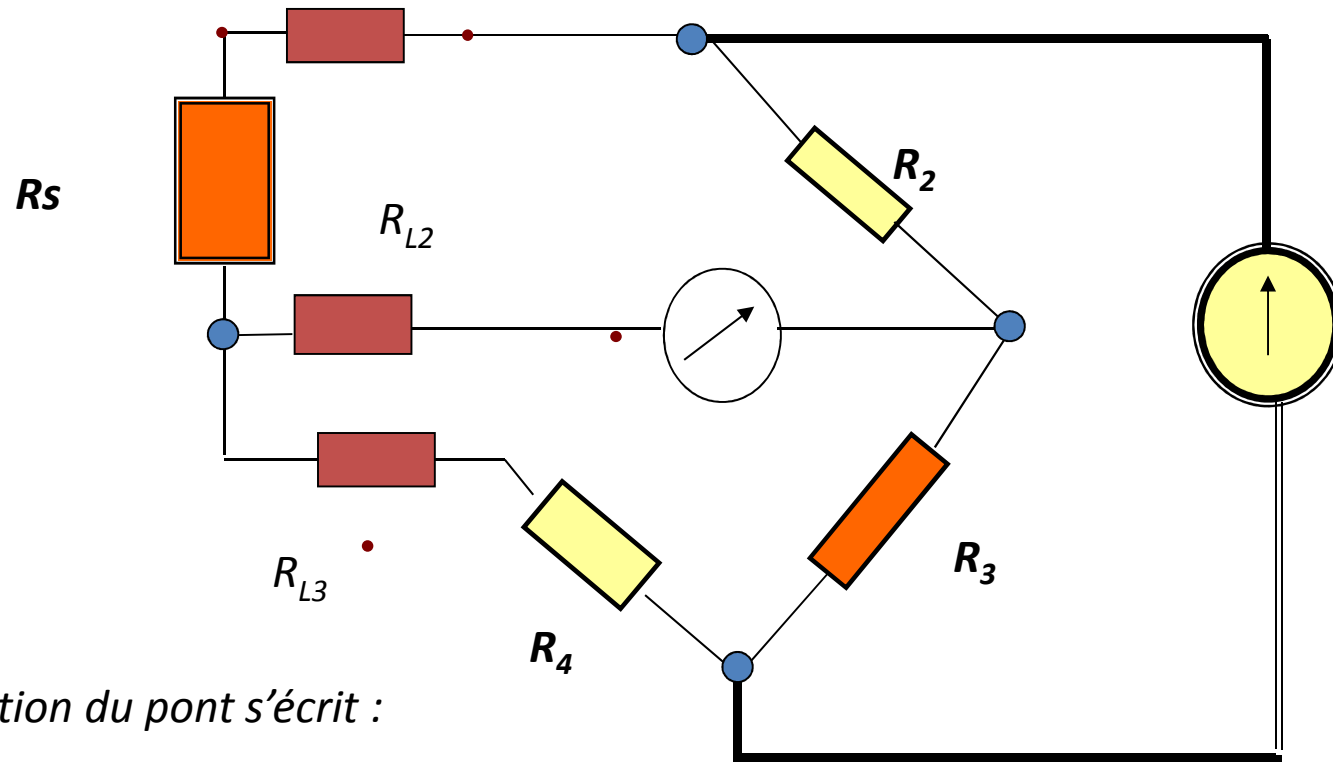
C'est la méthode la plus utilisée, elle est précise, on peut obtenir une précision de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour une température de $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui donne une précision relative de 0.025% .

Montage classique :



MONTAGE À 3 FILS

Montage courant, nécessite un équilibrage des lignes mais pour des précisions meilleures que le 1/10 ème de degré



A l'équilibre, l'équation du pont s'écrit :

$$(R_s + R_{L1}) \cdot R_3 = (R_4 + R_{L3}) \cdot R_2$$

$$R_s = (1 / R_3) \cdot (R_4 R_2 + R_4 R_{L1} - R_3 R_{L3})$$

avec le choix des résistances $R_3 = R_2$ l'influence des fils de liaison est largement atténuée.

Thermistance CTN

Ce sont les plus utilisées. Elles sont utilisées pour des mesures de température absolues et différentielles, mesures de débit et de niveau, régulation thermique. Elles possèdent un coefficient de température négatif. La résistance est donnée par la relation :

$$R(T) = R_0 \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

Avec R_0 : résistance à T_0 (en général 25 °C)

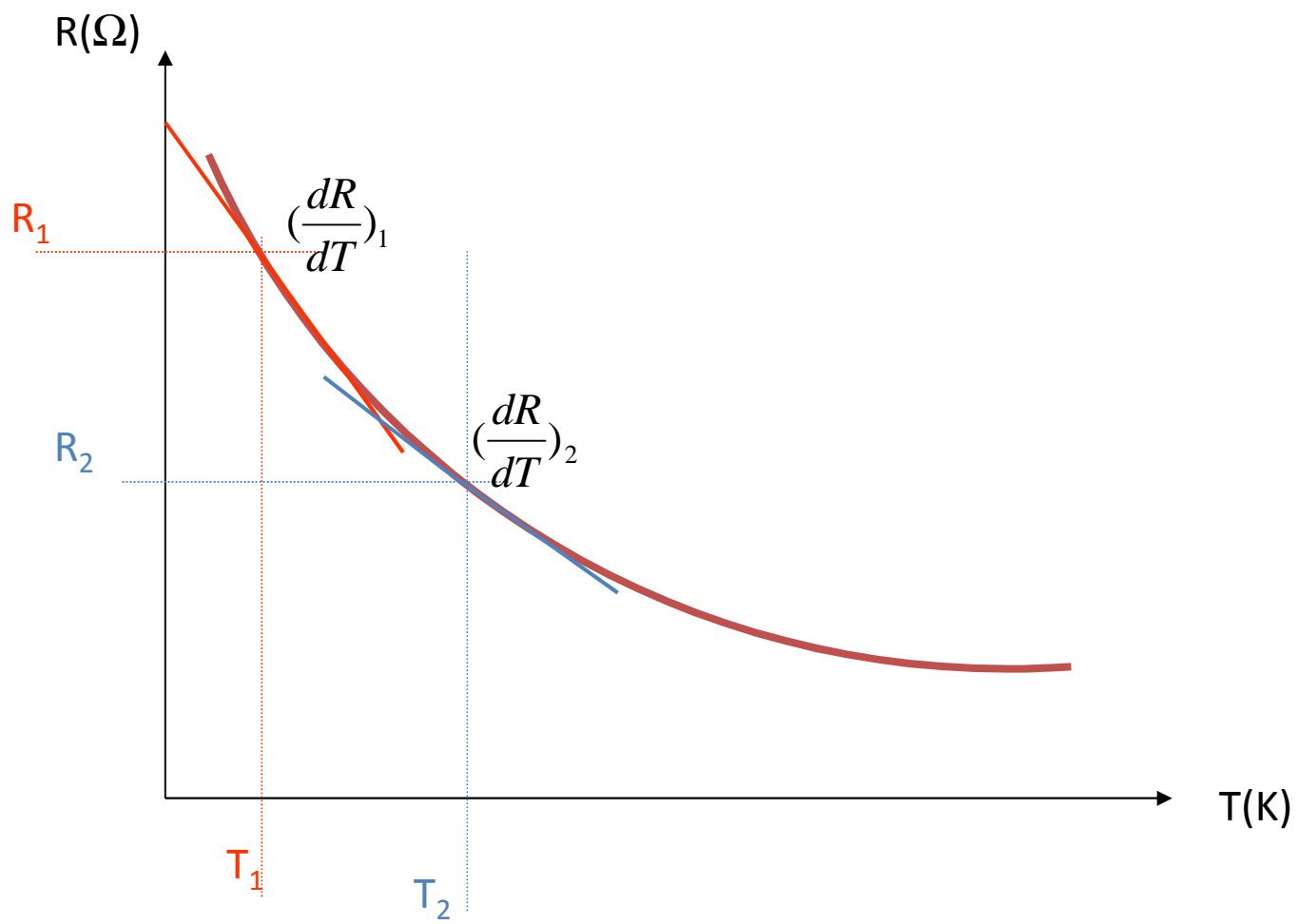
Le choix se fait d'après R_0 et le coefficient de température α à 25 °C.

On montre :

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{\beta}{T^2}$$

Le coefficient β est de l'ordre de 2500 à 5000K suivant le matériau.

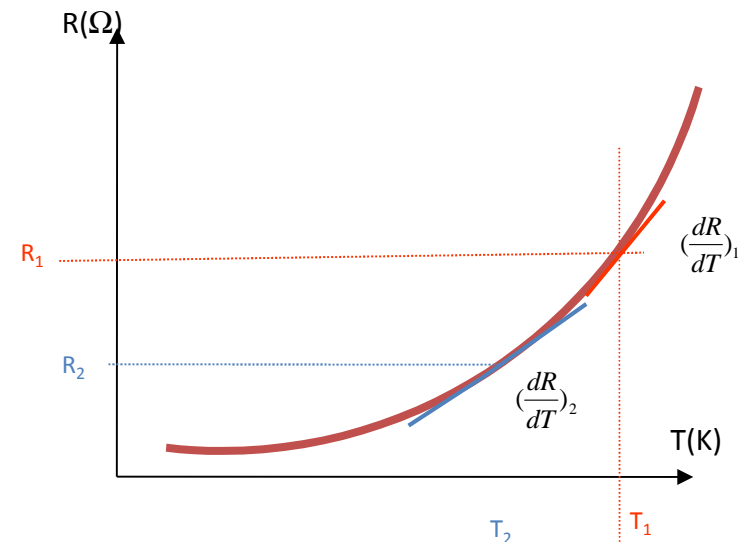
La sensibilité de ces capteurs est très élevée. R peut varier de 17000 à 700 Ω entre -30 et +30 °C.



*Ils permettent ainsi de détecter de très petites variations de température (environ 5.10^{-4})
 Ces capteurs, de petites dimensions voient leurs températures s'élever rapidement, ce qui provoque un fort échauffement
 par exemple, dans une thermistance de 2000Ω , une dissipation par effet Joule de 0.1 mW est obtenue pour un courant de $200 \mu\text{A}$
 En associant des thermistances et des résistances les constructeurs proposent des capteurs linéaires, ce qui permet des erreurs de linéarité inférieures à $\pm 0.04 \text{ }^\circ\text{C}$ sur une gamme de $100 \text{ }^\circ\text{C}$.
 L'inconvénient de l'utilisation de ces capteurs vient du fait qu'ils sont instables, vieillissent, non-linéaire et peu interchangeable avec une précision moyenne.*

Thermistance CTP :

Ces sondes dont le coefficient de température est positif ne sont utilisées que dans certains cas particuliers –
 contrôle, prévention des incidents(dépassement de seuils, commande de relais, protection et régulation thermique)
On utilise surtout les matériaux dont la caractéristique résistance-température présente une brusque variation.



Thermomètres au silicium :

On les nomme également silistors. Ils sont de technologie récente. Ils se présentent généralement sous forme de bâtonnets de silicium dopé pour que la *caractéristique résistance-température présente une grande plage de linéarité entre 100 et 200 °C.*

La relation $R(T)$ s'écrit dans ce cas sous la forme :

$$R(T) = R_0 [1 + a (T - T_0) + b (T - T_0)^2] \quad \text{avec } T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Où R_0 et T_0 correspondent aux valeurs à la température ambiante

Les bolomètres : *Pour mesurer de très faibles variations de température, on utilise un bolomètre. Il est constitué de 2 lames de platine identiques, de quelques microns d'épaisseurs, disposées chacune dans l'une des branches d'un pont de Wheatstone. La lame exposée au rayonnement est noircie, alors que l'autre, protégée du rayonnement, compense les effets de la variation de la température ambiante sur la résistance de la lame noircie.*

Un tel dispositif monté sur un pont très sensible, permet de mesurer des variations de température de l'ordre de 10^{-5} K

AUTRES MÉTHODES DE MESURE DE TEMPÉRATURE

L'évolution de la microélectronique a permis la réalisation de thermomètres simples, stables et peu coûteux, dont le fonctionnement repose sur l'influence de la température sur les propriétés électriques des composants. Ils ont généralement une bonne sensibilité mais une plage de fonctionnement réduite; on dit souvent « une faible dynamique »

On trouve ainsi les thermomètres suivants :

1. Thermomètre à diodes : Ces thermomètres sont alimentés dans le sens direct par un courant d'intensité constante I . On établit alors une relation de la forme :

$$I = I_0(T) \cdot \exp\left[\frac{Q_E \cdot U}{k_B \cdot T} - 1\right] \approx I_0(T) \cdot \exp\left[\frac{Q_E \cdot U}{k_B \cdot T}\right]$$

avec :

$$I_0(T) = C \cdot T^\alpha \exp\left[-\frac{Q_E \cdot U}{k_B \cdot T}\right]$$

avec : C : une constante

α : nombre voisin de 3

U_0 : tension caractéristique du matériau qui vaut $U_0 = 1,12$ V pour le Silicium. On en déduit :

$$U(T) = U_0(T) + \frac{k_B \cdot T}{Q_E} (\ln I - \alpha \cdot \ln T - \ln C)$$

On détermine ainsi une température T en mesurant la tension U .

On améliore la précision de la mesure en utilisant des couples de transistors montés en diodes ou des circuits intégrés.

. Thermomètre à Quartz : La fréquence mécanique d'oscillation d'un cristal de quartz dépend de la température T selon une loi expérimentale de la forme :

$$\nu(T) = \nu_0 (1 + A.T + B.T^2 + C.T^3)$$

D'où
$$\frac{\Delta \nu}{\nu_0} = (A.T + B.T^2 + C.T^3)$$

En mesurant la variation relative de fréquence, on accède à la température. Ils sont d'une grande précision (on détecte des écarts de l'ordre de 10^{-4} K) et d'une grande sensibilité (environ 1000 Hz/K).

1. Autres thermomètres :

Diverses méthodes existent, elles permettent dans certains cas d'avoir un ordre de grandeur de la température d'un milieu déterminé :

- Cônes de Seger,
- crayons,
- vernis

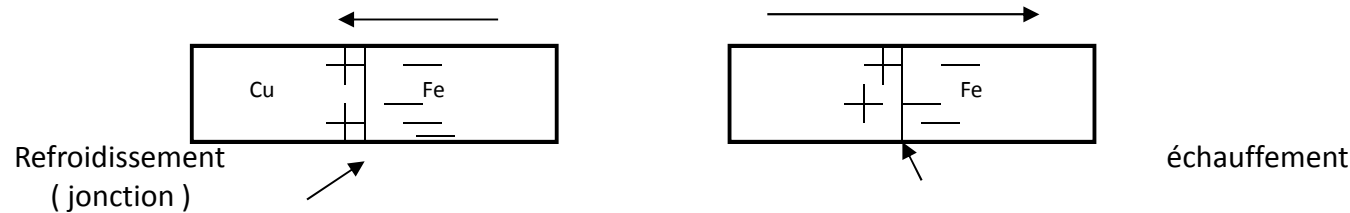
LES COUPLES THERMOELECTRIQUES

PROPRIÉTÉS DES F.E.M THERMOELECTRIQUES :

Origine des forces thermoélectriques : effet Seebeck.

Effet Peltier : effet thermique autre que l'effet Joule résultant du passage d'un courant à la jonction de deux matériaux A et B de nature différente. (f.e.m de contact, résultant de la différence de mobilité des électrons des 2 conducteurs)

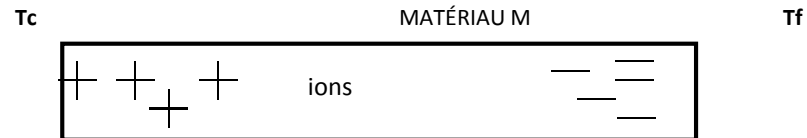
Sens du courant



Exemple de f.é.m de Peltier :

$$E_p(\text{Cu-Fe}) = 3 \text{ mV}$$

Effet Thomson :



D'où une d.d.p de Thomson.

Cette d.d.p est très variable selon l'entropie des électrons, qui diffère d'un matériau à un autre.

La mise en évidence d'un effet Thomson suppose l'existence d'un circuit composé d'au moins deux conducteurs de caractéristiques thermoélectriques différentes.

L'effet Thomson est donc un effet thermique autre que l'effet Joule résultant d'un passage de courant électrique dans un conducteur dans lequel il existe un gradient de température.

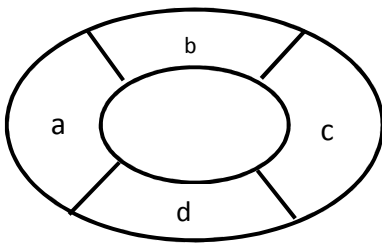
- f.é.m de Thomson :

$$E(m, T_c \rightarrow T_f) = \int_{T_c}^{T_f} h_m(\theta) d\theta$$

- où h_m : coefficient de Thomson > 0

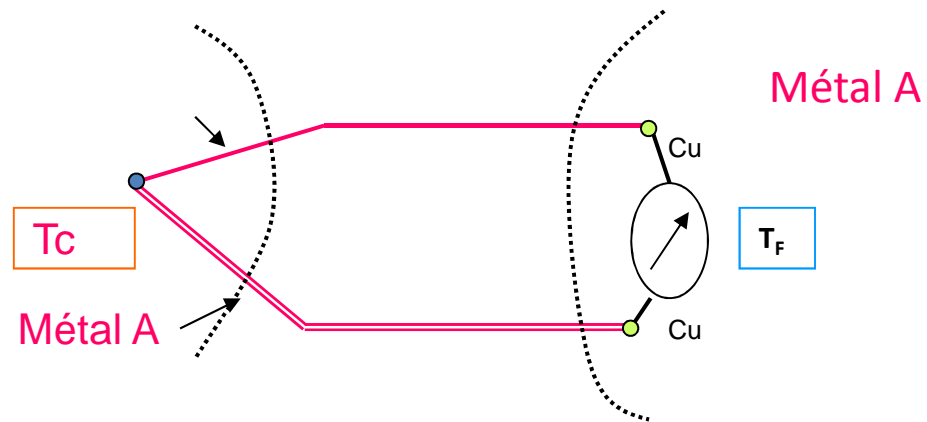
Exemples : $h(\text{Cu}) \approx 2.2 \mu\text{V}$; $h(\text{Fe}) \approx -8.4 \mu\text{V}$

Loi de Volta : dans un circuit fermé isotherme constitué de conducteurs différents, la somme des f.é.m de Peltier est nulle.

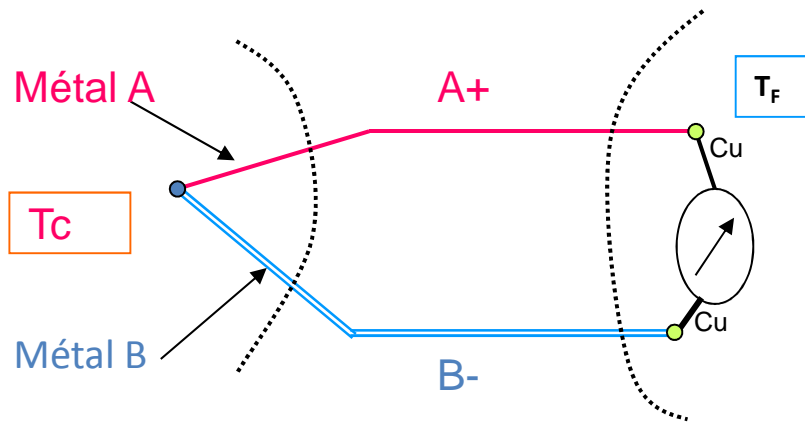


$$E_p(a/b, T) + E_p(b/c, T) + E_p(c/d, T) = 0$$

Par conséquent, la f.é.m d'une chaîne de matériaux homogènes isothermes est la même que celle qui existerait si les deux matériaux étaient directement en contact.



$$\Delta E = \int_f^c \left(\frac{dE}{dT} \right)_A dT + \int_c^f \left(\frac{dE}{dT} \right)_A dT = 0$$



$$\Delta E = \int_f^c \left(\frac{dE}{dT} \right)_A dT + \int_c^f \left(\frac{dE}{dT} \right)_B dT \neq 0$$

L'effet Seebeck est donc la combinaison des effets Peltier et Thomson.

- **Considérations pratiques :**

Une des jonctions est portée à une température connue, l'autre est à la température à déterminer (mesure ponctuelle).

- **Etalonnage du thermocouple :**

On maintient la jonction de référence à 0 °C.

On relève $E(a / b, T)$ de la jonction de mesure.

- **Variation de $E(a / b, T)$:**

$$E(a / b, T) = aT + bT^2 + cT^3 + \dots$$

- **Sensibilité du couple thermoélectrique :**

$$\sigma(T) = \frac{dE(a / b, T)}{dT}$$

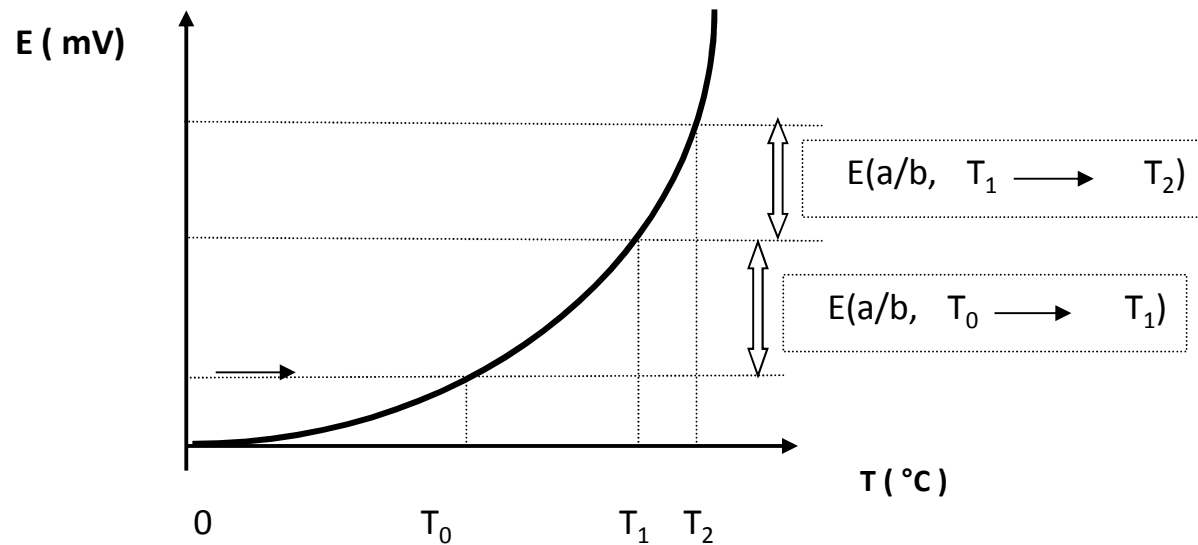
On retiendra :

pour le couple **Chrome – Alumel (type K)**

$$\overline{\sigma_K} = 41 \mu V / ^\circ C$$

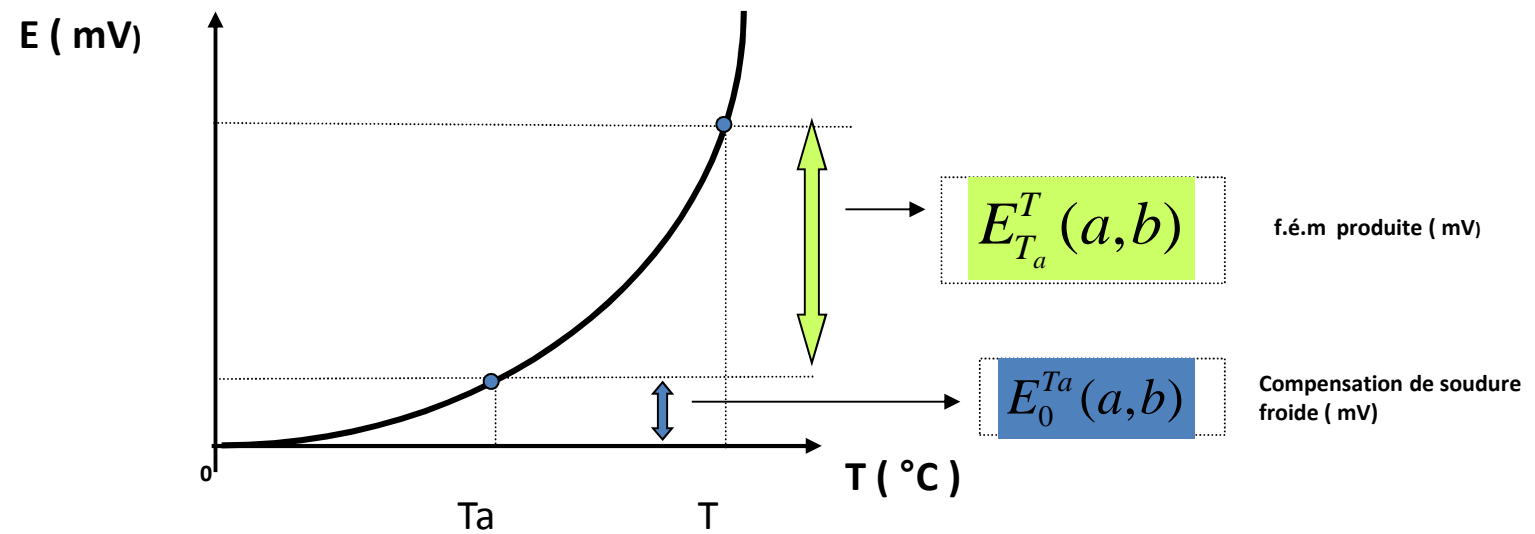
- **Thermocouples usuels : voir détails ci-après.**
- Les caractéristiques essentielles des couples thermoélectriques reconnus pour leurs interchangeabilités et leurs accessoires ont fait l'objet de plusieurs normes (NF C-42.321, NF C-42.322, NF C-42.323) .
- Le thermocouple type S (Platine - Rhodium 10 % / Platine) est reconnu comme le plus stable ; il permet d'obtenir une précision de l'ordre du degré.
- La norme NF C-42.322 définit 3 classes de tolérance, qui sont exprimées soit par un écart en °C, soit par un pourcentage de la température mesurée, la plus grande de ces deux valeurs étant celle à retenir.
- En règle générale, les constructeurs proposent des couples dans la tolérance de classe 2.

Loi des températures successives :

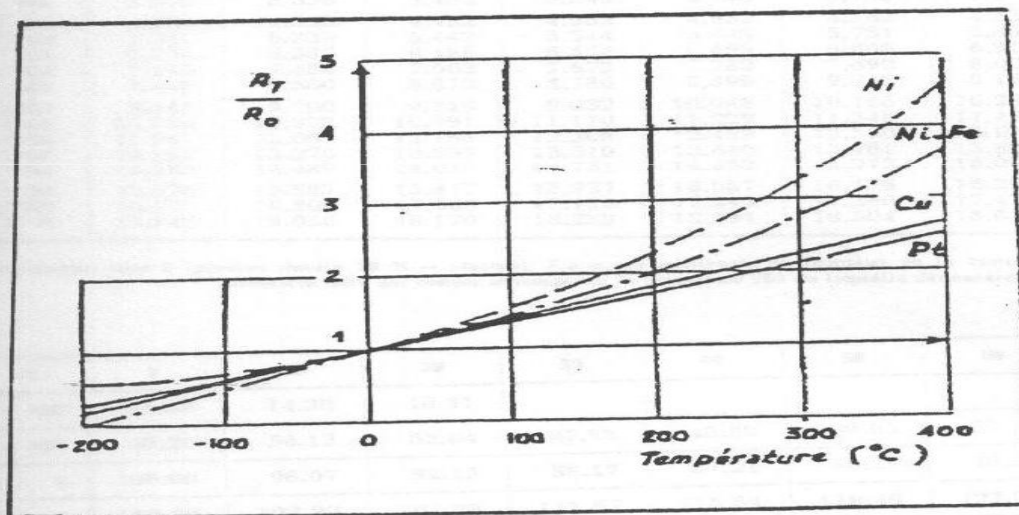
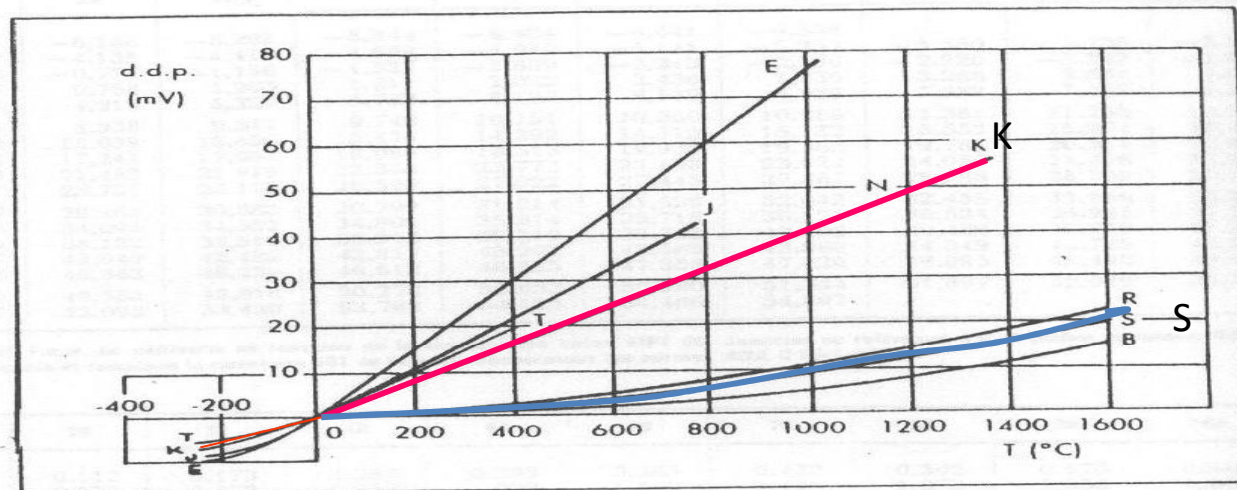


Sachant que la f.é.m $E(a/b, T_0 \text{ à } T_1)$ peut être une compensation de soudure froide ($T_0 = T_{\text{amb}}$)
 Et la f.é.m totale est donnée par la relation :

D'un point de vue pratique, on utilisera la relation simplifiée suivante :



$$E_0^T(a/b) = E_0^{T_a}(a/b) + E_{T_a}^T(a/b)$$



MATERIAU	TEMPERATURE MAXIMALE	R_{100} / R_0	LINEARITE %
Platine	-250 à +850	1,392	+0,61
Nickel	- 80 à +300	1,672	-1,61
Nickel-Fer	-200 à +230	1,518	-1,17
Cuivre	-200 à +260	1,427	0

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
200	-5,891	-6,035	-6,158	-6,262	-6,344	-6,404	-6,441	-6,358	-5,550	-5,730	-5,391
100	-3,553	-3,852	-4,138	-4,410	-4,669	-4,912	-5,141	-5,354	-5,550	-5,730	-5,391
0	-0,000	-0,392	-0,777	-1,156	-1,527	-1,889	-2,243	-2,586	-2,920	-3,242	-3,553
100	0,000	0,397	0,798	1,203	1,611	2,022	2,436	2,850	3,266	3,681	4,095
200	4,095	4,508	4,919	5,327	5,733	6,137	6,539	6,939	7,338	7,737	8,137
300	8,137	8,537	8,938	9,341	9,745	10,151	10,560	10,969	11,381	11,793	12,207
400	12,207	12,623	13,039	13,456	13,874	14,292	14,712	15,132	15,552	15,974	16,395
500	16,395	16,818	17,241	17,664	18,088	18,513	18,938	19,363	19,788	20,214	20,640
600	20,640	21,066	21,493	21,919	22,346	22,772	23,198	23,624	24,050	24,476	24,902
700	24,902	25,327	25,751	26,176	26,599	27,022	27,445	27,867	28,288	28,709	29,128
800	29,128	29,547	29,965	30,383	30,799	31,214	31,629	32,042	32,455	32,866	33,277
900	33,277	33,686	34,095	34,502	34,909	35,314	35,718	36,121	36,524	36,925	37,325
1000	37,325	37,724	38,122	38,519	38,915	39,310	39,703	40,096	40,488	40,879	41,269
1100	41,269	41,657	42,045	42,432	42,817	43,202	43,585	43,968	44,349	44,729	45,108
1200	45,108	45,486	45,863	46,238	46,612	46,985	47,356	47,726	48,095	48,462	48,828
1300	48,828	49,192	49,555	49,916	50,276	50,633	50,990	51,344	51,697	52,049	52,398
1400	52,398	52,747	53,093	53,439	53,782	54,125	54,466	54,807			

Thermocouple type K (chromel-alumel). F.é.m. en millivolts en fonction de la température selon EIPT 58. Jonction de référence à 0 °C (selon circulaire NBS qui annule et remplace la circulaire 561 de laquelle découlaient les normes ASA C 96-1-1964).

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,000	0,055	0,113	0,173	0,235	0,299	0,365	0,432	0,502	0,573	0,645
100	0,645	0,719	0,795	0,872	0,950	1,029	1,109	1,190	1,273	1,356	1,440
200	1,440	1,525	1,611	1,698	1,785	1,873	1,962	2,051	2,141	2,232	2,323
300	2,323	2,414	2,506	2,599	2,692	2,786	2,880	2,974	3,069	3,164	3,260
400	3,260	3,356	3,452	3,549	3,645	3,743	3,840	3,938	4,036	4,135	4,234
500	4,234	4,333	4,432	4,532	4,632	4,732	4,832	4,933	5,034	5,136	5,237
600	5,237	5,339	5,442	5,544	5,648	5,751	5,855	5,960	6,064	6,169	6,274
700	6,274	6,380	6,486	6,592	6,699	6,805	6,913	7,020	7,128	7,236	7,345
800	7,345	7,454	7,563	7,672	7,782	7,892	8,003	8,114	8,225	8,336	8,448
900	8,448	8,560	8,673	8,786	8,899	9,012	9,126	9,240	9,355	9,470	9,585
1000	9,585	9,700	9,816	9,932	10,048	10,165	10,282	10,400	10,517	10,635	10,754
1100	10,754	10,872	10,991	11,110	11,229	11,348	11,467	11,587	11,707	11,827	11,947
1200	11,947	12,067	12,188	12,308	12,429	12,550	12,671	12,792	12,913	13,034	13,155
1300	13,155	13,276	13,397	13,519	13,640	13,761	13,883	14,004	14,125	14,247	14,368
1400	14,368	14,489	14,610	14,731	14,852	14,973	15,094	15,215	15,336	15,456	15,576
1500	15,576	15,697	15,817	15,937	16,057	16,176	16,296	16,416	16,534	16,653	16,771
1600	16,771	16,890	17,008	17,125	17,243	17,360	17,477	17,594	17,711	17,826	17,942
1700	17,942	18,056	18,170	18,282	18,394	18,504	18,612				

Thermocouple type S (platine rhodié 10 % — platine). F.é.m. en millivolts en fonction de la température selon EIPT 58. Jonction de référence à 0 °C (selon circulaire NBS qui annule et remplace la circulaire 561 de laquelle découlaient les normes ASA C 96-1-1964).

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 200	18,53	14,36	10,41								
- 100	60,20	56,13	52,04	47,93	43,80	39,65	35,48	31,28	27,05	22,78	18,53
(-) 0	100,00	96,07	92,13	88,17	84,21	80,25	76,28	72,29	68,28	64,25	60,20
(+) 0	100,00	103,90	107,79	111,67	115,54	119,40	123,24	127,07	130,89	134,70	138,50
100	138,50	142,28	146,06	149,82	153,57	157,32	161,04	164,76	168,47	172,16	175,84
200	175,84	179,51	183,17	186,82	190,46	194,08	197,70	201,30	204,88	208,46	212,03
300	212,03	215,58	219,13	222,66	226,18	229,69	233,19	236,67	240,15	243,61	247,06
400	247,06	250,50	253,93	257,34	260,75	264,14	267,52	270,89	274,25	277,60	280,93
500	280,93	284,26	287,57	290,87	294,16	297,43	300,70	303,95	307,20	310,43	313,65
600	313,65	316,86	320,05	323,24	326,41	329,57	332,72	335,86	338,99	342,10	345,21
700	345,21	348,30	351,38	354,45	357,51	360,55	363,59	366,61	369,62	372,62	375,61
800	375,61	378,59	381,55	384,50	387,45	390,38					

Norme DIN 43750 (EIPT 48). Valeur de la résistance (Ω) en fonction de la température (°C) pour les résistances de platine.

Thermocouple type E : CHROMEL / CONSTANTAN

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 200	-8824	-9063	-9274	-9455	-9604	-9719	-9797	-9835			
- 100	-5237	-5680	-6107	-6516	-6907	-7279	-7631	-7963	-8273	-8561	-8824
- 0	0	- 581	-1151	-1709	-2254	-2787	-3306	-3811	-4301	-4777	-5237
+ 0	0	591	1192	1801	2419	3047	3683	4329	4983	5646	6317
100	6317	6996	7683	8377	9078	9787	10501	11222	11949	12681	13419
200	13419	14161	14909	15661	16417	17178	17942	18710	19481	20256	21033
300	21033	21814	22597	23383	24171	24961	25754	26549	27345	28143	28943
400	28943	29744	30546	31350	32155	32960	33767	34574	35382	36190	36999
500	36999	37808	38617	39426	40236	41045	41853	42662	43470	44278	45085
600	45085	45891	46697	47502	48306	49109	49911	50713	51513	52312	53110
700	53110	53907	54703	55498	56291	57083	57873	58663	59451	60237	61022
800	61022	61806	62588	63368	64147	64924	65700	66473	67245	68015	68783
900	68783	69549	70313	71075	72835	72593	73350	74104	74857	75608	76358
1000	76358										

Thermocouple type S : PLATINE - RHODIUM (10%) / PLATINE

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 0	0	- 53	- 103	- 150	- 194	- 236					
+ 0	0	55	113	173	235	299	365	432	502	573	645
100	645	719	795	872	950	1029	1109	1190	1273	1356	1440
200	1440	1525	1611	1698	1785	1873	1962	2051	2141	2232	2323
300	2323	2414	2506	2599	2692	2786	2880	2974	3069	3164	3260
400	3260	3356	3452	3549	3645	3743	3840	3938	4036	4135	4234
500	4234	4333	4432	4532	4632	4732	4832	4933	5034	5136	5237
600	5237	5339	5442	5544	5648	5751	5855	5960	6064	6169	6274
700	6274	6380	6486	6592	6699	6805	6913	7020	7128	7236	7345
800	7345	7454	7563	7672	7782	7892	8003	8114	8225	8336	8448
900	8448	8560	8673	8786	8899	9012	9126	9240	9355	9470	9585
1000	9585	9700	9816	9932	10048	10165	10282	10400	10517	10635	10754
1100	10754	10872	10991	11110	11229	11348	11467	11587	11707	11827	11947
1200	11947	12067	12188	12308	12429	12550	12671	12792	12913	13034	13155
1300	13155	13276	13397	13519	13640	13761	13883	14004	14125	14247	14368
1400	14368	14489	14610	14731	14852	14973	15094	15215	15336	15456	15576
1500	15576	15697	15817	15937	16057	16176	16296	16415	16534	16653	16771
1600	16771	16890	17008	17125	17243	17360	17477	17594	17711	17826	17942
1700	17942	18056	18170	18282	18394	18504	18612				

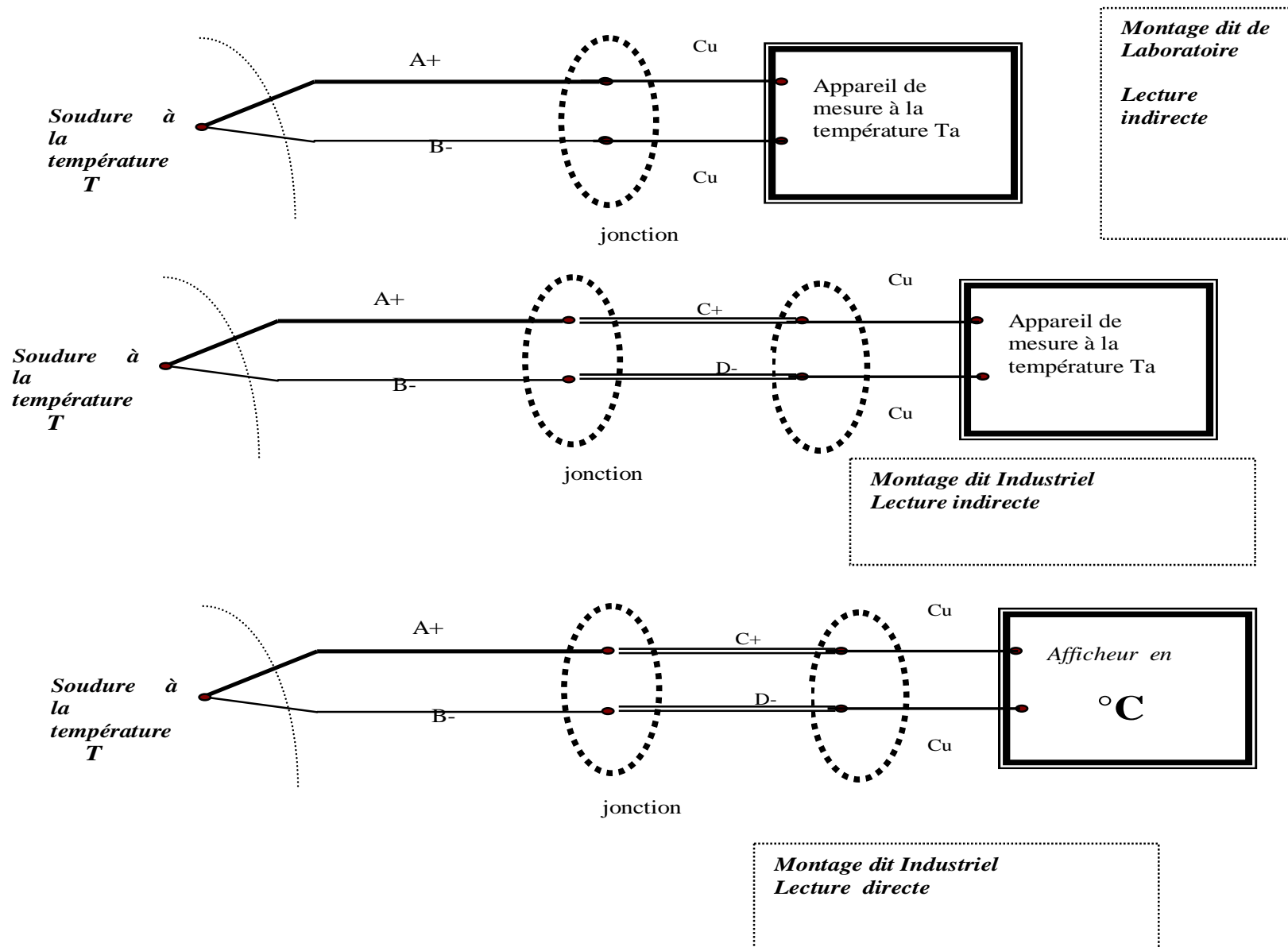
Thermocouple type R : PLATINE – RHODIUM (13%) / PLATINE

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 0	0	- 31	- 100	- 165	- 188	- 226					
+ 0	0	54	111	171	232	296	363	431	501	573	647
100	647	723	800	879	959	1041	1124	1208	1294	1380	1468
200	1468	1557	1647	1738	1830	1923	2017	2111	2207	2303	2400
300	2400	2498	2596	2695	2795	2896	2997	3099	3201	3304	3407
400	3407	3511	3616	3721	3826	3933	4039	4146	4254	4362	4471
500	4471	4580	4689	4799	4910	5021	5132	5244	5356	5469	5582
600	5582	5696	5810	5925	6040	6155	6272	6388	6505	6623	6741
700	6741	6860	6979	7098	7218	7339	7460	7582	7703	7826	7949
800	7949	8072	8196	8320	8445	8570	8696	8822	8949	9076	9203
900	9203	9331	9460	9589	9718	9848	9978	10109	10240	10371	10503
1000	10503	10636	10768	10902	11035	11170	11304	11439	11574	11710	11846
1100	11846	11983	12119	12257	12394	12532	12669	12808	12946	13085	13224
1200	13224	13363	13502	13642	13782	13922	14062	14202	14343	14483	14624
1300	14624	14765	14906	15047	15188	15329	15470	15611	15752	15893	16035
1400	16035	16176	16317	16458	16599	16741	16882	17022	17163	17304	17445
1500	17445	17585	17726	17866	18006	18146	18286	18425	18564	18703	18842
1600	18842	18981	19119	19257	19395	19533	19670	19807	19944	20080	20215
1700	20215	20350	20483	20616	20748	20878	21006				

Thermocouple type B : PLATINE – RHODIUM (30%) / PLATINE – RHODIUM (6%)

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0	- 2	- 3	- 2	0	2	6	11	17	25	33
100	33	43	53	65	78	92	107	123	140	159	178
200	178	199	220	243	266	291	317	344	372	401	431
300	431	462	494	527	561	596	632	669	707	746	786
400	786	827	870	913	957	1002	1048	1095	1143	1192	1241
500	1241	1292	1344	1397	1450	1505	1560	1617	1674	1732	1791
600	1791	1851	1912	1974	2036	2100	2164	2230	2296	2363	2430
700	2430	2499	2569	2639	2710	2782	2855	2928	3003	3078	3154
800	3154	3231	3308	3387	3466	3546	3626	3708	3790	3873	3957
900	3957	4041	4126	4212	4298	4386	4474	4562	4652	4742	4833
1000	4833	4924	5016	5109	5202	5297	5391	5487	5583	5680	5777
1100	5777	5875	5973	6073	6172	6273	6374	6475	6577	6680	6783
1200	6783	6887	6991	7096	7202	7308	7414	7521	7628	7736	7845
1300	7845	7953	8063	8172	8283	8393	8504	8616	8727	8839	8952
1400	8952	9065	9178	9291	9405	9519	9634	9748	9863	9979	10094
1500	10094	10210	10325	10441	10558	10674	10790	10907	11024	11141	11257
1600	11257	11374	11491	11608	11725	11842	11959	12076	12193	12310	12426
1700	12426	12543	12659	12776	12892	13008	13124	13239	13354	13470	13585
1800	13585	13699	13814								

3 montages possibles



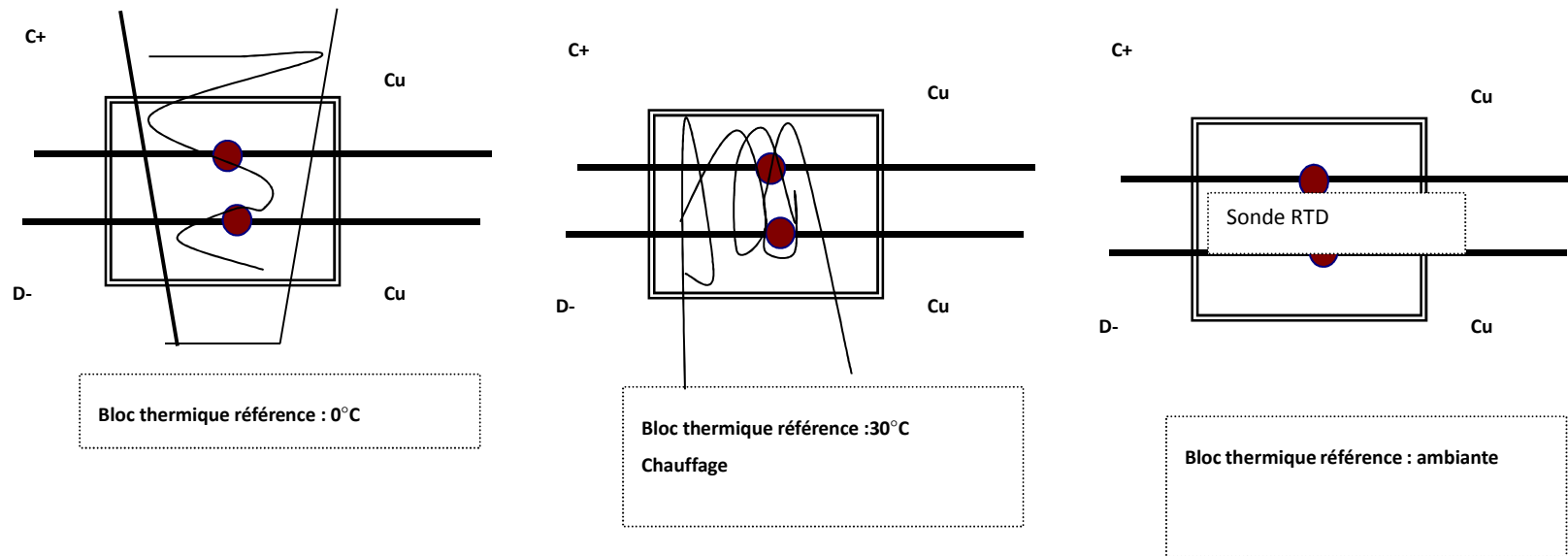
- Les câbles de compensation, moins coûteux, sont utilisés pour les montages nécessitant de grandes longueurs de câbles de liaison entre le couple et l'afficheur. Ils doivent cependant respecter deux règles :
- avoir les mêmes propriétés thermoélectriques que le couple utilisé,
- avoir le même pouvoir thermoélectrique.
- La norme CEI 584.3 définit un système international d'identification par code de couleur .et propose une table de tolérance.

L'une des fréquentes et importantes causes d'erreur est l'inversion de polarité avec les fils du thermocouple dans la boîte de raccordement : avec un type K, on peut engendrer jusqu'à 100 °C d'erreur.

La compensation de soudure froide :

Pour s'affranchir de la température ambiante et de ses fluctuations, un dispositif dit de compensation de soudure froide s'avère nécessaire pour placer la jonction de référence dans un environnement à température connue.

Première solution : Un bac de glace en fusion ou une enceinte climatique avec des éléments refroidisseurs à effet Peltier permettent de maintenir la référence à 0°C ; Cette dernière solution est dite boîte de compensation de soudure froide ; elle est lourde industriellement.



Deuxième solution : Les jonctions de référence sont laissées à la température ambiante à l'abri des courants d'air de façon à thermostatater. La température de référence est mesurée par une sonde résistive. Des composants électroniques compensent alors l'effet de la température ambiante.

- **Les circuits de conditionnement des thermocouples :**

- La plupart des transmetteurs industriels convertissent la fém en un signal 4 – 20 mA. Ils se montent en tête de canne ou en armoire ; ils acceptent des températures ambiantes entre -20 °C et 80 °C sans que la mesure de la température en soit altérée.
- La stabilité en température (dérive du zéro et de la pleine échelle) est meilleure que 0,05 % de la plage de mesure par °C de température ambiante.
- L'erreur due à la compensation de la soudure froide est inférieure à 0,04 °C par °C de température ambiante.
- L'erreur de linéarisation est inférieure à 0,5 °C de la plage de mesure.

Exemple :

La tolérance attendue d'un transmetteur pour un thermocouple de type J, réglé pour la plage 100 à 200 °C, soumis à une variation de la température ambiante de 40 °C :

-*stabilité* : $\pm 0,05\% \cdot 40 \text{ °C} (200-100) = \pm 2 \text{ °C}$
 -*compensation de SF* : $\pm 0,04 \cdot 40 \text{ °C} = \pm 1,6 \text{ °C}$
 -*linéarisation* : $\pm 0,5\% \cdot (200-100) = \pm 0,5 \text{ °C}$

soit :

$$\pm \sqrt{2^2 + 1,6^2 + 0,5^2} = \pm 2,6 \text{ °C}$$

or pour le thermocouple de type J : $\pm 3\% \cdot (200-100) = \pm 3 \text{ °C}$

soit :

$$\pm \sqrt{2,6^2 + 3^2} = \pm 4 \text{ °C}$$

Exemple :

La tolérance attendue d'un transmetteur pour un thermocouple de type J, réglé pour la plage 100 à 200 °C, soumis à une variation de la température ambiante de 40 °C :

$$\begin{aligned} \text{-stabilité} & : \pm 0,05\% \cdot 40 \text{ °C} (200-100) = \pm 2 \text{ °C} \\ \text{-compensation de SF} & : \pm 0,04 \cdot 40 \text{ °C} = \pm 1,6 \text{ °C} \\ \text{-linéarisation} & : \pm 0,5\% \cdot (200-100) = \pm 0,5 \text{ °C} \end{aligned}$$

soit :

$$\pm \sqrt{2^2 + 1,6^2 + 0,5^2} = \pm 2,6 \text{ °C}$$

or *pour le thermocouple de type J* : $\pm 3\% \cdot (200-100) = \pm 3 \text{ °C}$

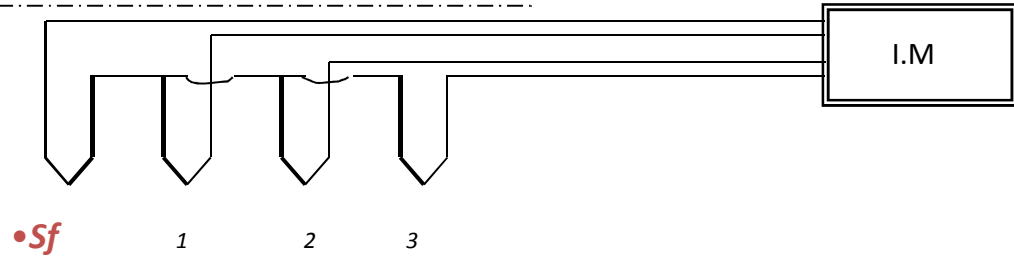
soit :

$$\pm \sqrt{2,6^2 + 3^2} = \pm 4 \text{ °C}$$

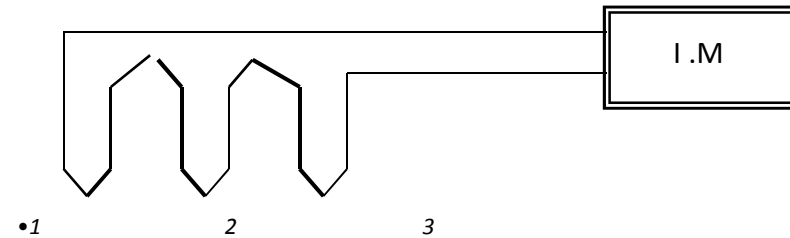
- **Remarque :** Les transmetteurs numériques apportent une amélioration notable. Le signal du thermocouple est compensé au niveau de la soudure froide puis numérisé. Les processeurs prennent en charge les opérations d'interpolations des tables, de linéarisation.
- Le numérique apporte de grandes opportunités en termes de communications des données : mise en réseau sur bus de terrain, paramétrage et diagnostic à distance.
- Les auto tests sont une des grande évolution actuelle de la thermométrie.

AUTRES MONTAGES

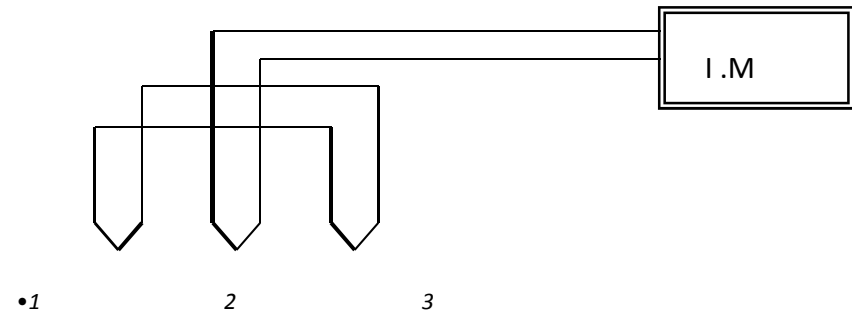
• **Montage utilisant plusieurs thermocouples et un seul instrument de mesure IM-** : mesures de températures sur des sites



• **Montage de thermocouples en série** : permet d'obtenir une f.é.m plus grande par addition des différentes f.é.m.



• **Montage de thermocouples en parallèle** : permet d'obtenir une température moyenne d'un domaine non isotherme.



• **Montage de thermocouples montés en opposition**

permet de mesurer la différence de 2 températures avec 2 couples de même nature.

