

Cours #6: Mesure de température

GPA-668: Hiver 2010



Capteurs et détecteurs de température

- La température est une grandeur non-directement mesurable, mais repérable par la variation d'une grandeur associée (résistance, dilatation).



Critères de sélection

- Gamme de température
- Précision souhaitée
- Temps de réponse
 - Masse/volume du capteur
 - Équilibre thermique
- Accessibilité/Environnement



Capteurs et détecteurs de température (2)

- Avec contact:
 - Analogique:
 - Couples thermoélectriques (Thermocouples);
 - Thermomètres à résistance métallique;
 - Thermomètres à semi-conducteur;
 - Thermomètres à quartz;
 - Thermomètres à dilatation de fluide.
 - Logique:
 - Thermostats à dilatation de solide.

Capteurs et détecteurs de température (3)

- Sans contact:
 - Analogique:
 - Pyromètres optiques;
 - Pyromètres optiques à dilatation de solide.
 - Logique:
 - Thermostat à dilatation de solide.

Unités de mesure thermiques

- Échelle Celsius (1742):
 - Échelle relative:
 - Références:
 - Fusion de la glace à 0 °C;
 - Ébullition de l'eau distillée à 100 °C.

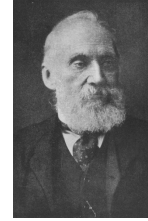


Unités de mesure thermiques

■ Échelle Kelvin (1848):

□ Échelle absolue:

- Références:
 - Zéro thermodynamique: 0 k;
 - Point triple de l'eau (0.01 °C): 273.16 k.



$$T(^{\circ}C) = T(k) - 273.15$$

Unités de mesure thermiques

• Échelle Fahrenheit (1707):

– Échelle relative:

- Références:
 - T. minimum solution aqueuse de NaCl: 0 °F;
 - Température du corps humain: 96 °F;
 - Température d'un cheval sain: 100 °F.



$$T(^{\circ} F) = \frac{9}{5} T(^{\circ} C) + 32$$

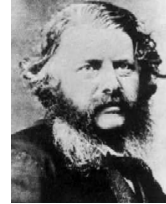
Unités de mesure thermiques

■ Échelle Rankine:

□ Échelle absolue du Fahrenheit:

• Références:

- Zéro thermodynamique: 0 °R;
- Point triple de l'eau (0.01 °C): 459.7 °F.



$$T(^{\circ} F) = T(^{\circ} R) - 459.7$$

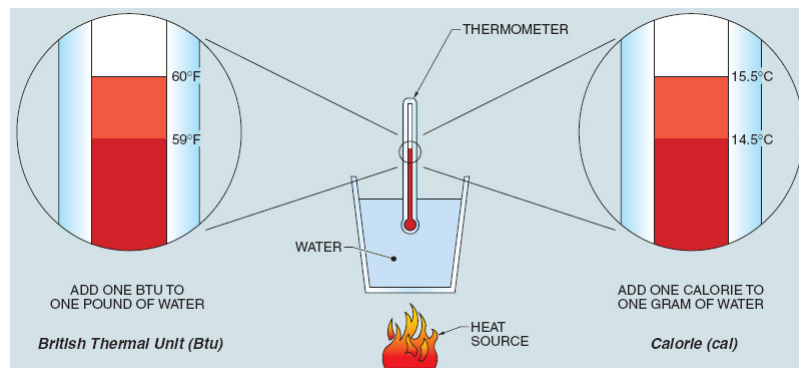
Températures de référence

- -182,97 °C:
 - équilibre vapeur-liquide - oxygène;
- 0,00 °C:
 - équilibre solide-liquide - eau;
- 0,01 °C:
 - point triple de l'eau;
- 100,00 °C:
 - équilibre vapeur-liquide - eau;

Températures de référence

- 419,58 °C:
 - équilibre solide-liquide - zinc;
- 444,67 °C:
 - équilibre vapeur-liquide - soufre;
- 961,62 °C:
 - équilibre solide-liquide - argent;
- 1064,43 °C:
 - équilibre solide-liquide - or.

Relation énergie vs température





Transmission d'énergie thermique

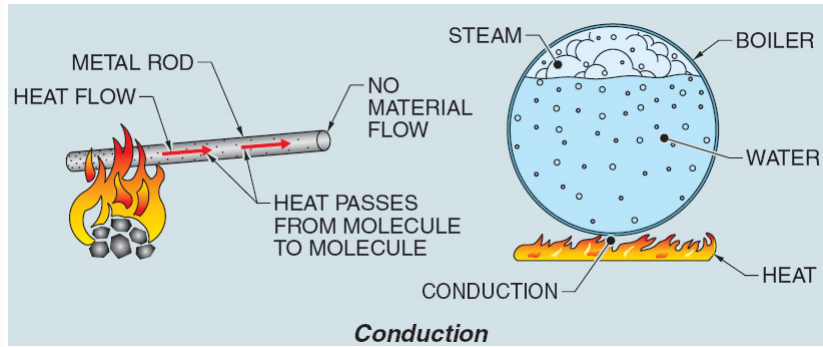
- Équilibre thermique
 - La mesure de la température implique qu'il y ait un équilibre thermique entre l'objet et le capteur.
- La température mesurée n'est pas celle de l'objet, mais celle du capteur.



Transmission d'énergie thermique

- Dans le contact thermique entre le capteur et l'objet, 3 phénomènes entrent en jeu:
 - La conduction
 - La convection
 - Le rayonnement

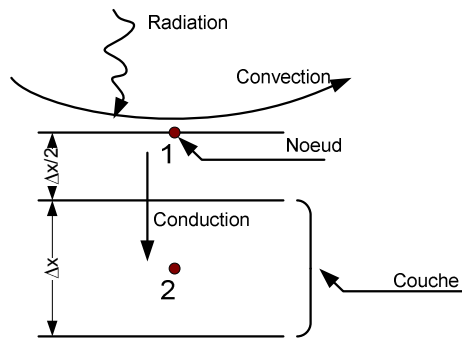
Conduction thermique



Conduction thermique

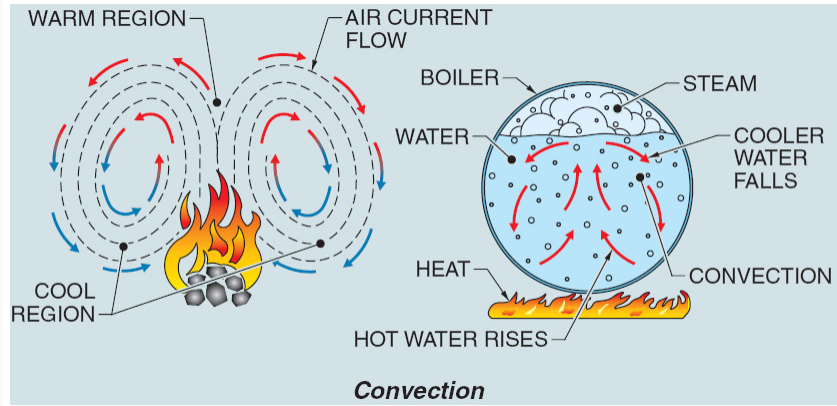
- Loi de Newton:

$$Q_{cond} = \frac{kA}{\Delta x} (T_2 - T_1)$$



- k = conduction thermique W/(m.K);
- A = Section (m²);
- Δx = épaisseur d'une couche (m).

Convection thermique

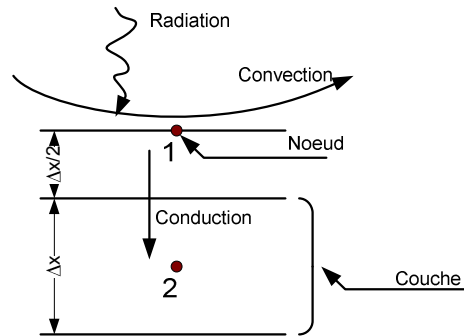


Convection

Convection thermique

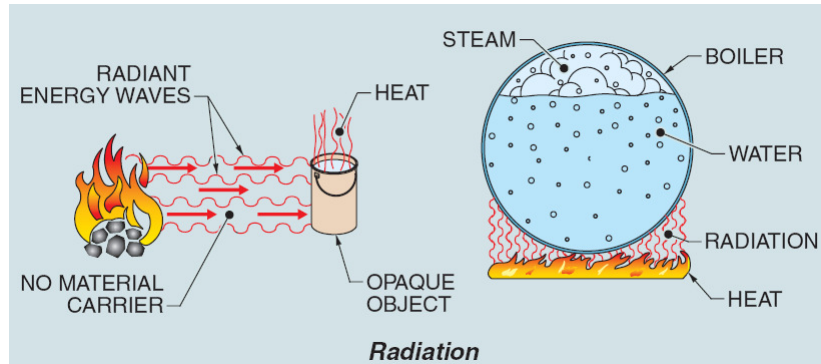
■ Équation:

$$Q_{conv} = hA(T_{\infty} - T_1)$$



- h = constante de convection $W/(m^2.K)$;
- A = Section (m^2).

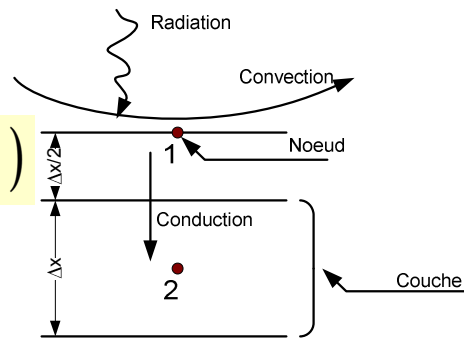
Radiation thermique



Radiation thermique

■ Équation:

$$Q_{Rad} = \sigma A \epsilon F (T_{heater}^4 - T_1^4)$$



- σ = constante de Stefan-Boltzmann
 $5.55 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;
- ϵ = émissivité
- F = « view factor »

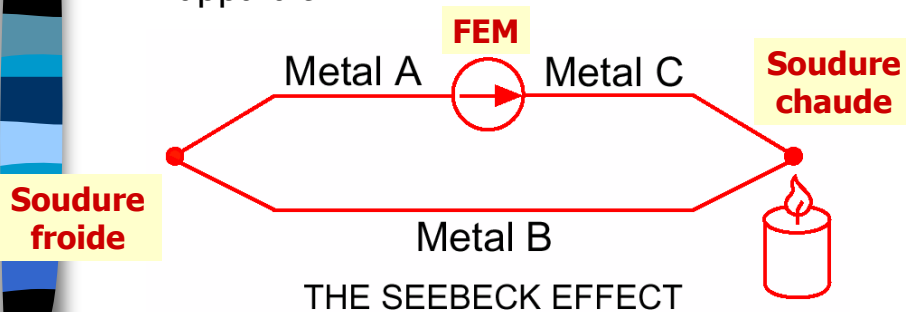
Couples thermoélectriques



Principe



- Effet Seebeck:
 - Lorsque deux conducteurs de métaux différents sont connectés ensemble en 2 points, et que ces jonctions sont à des températures différentes, une F.E.M. apparaît.



Couples thermoélectriques

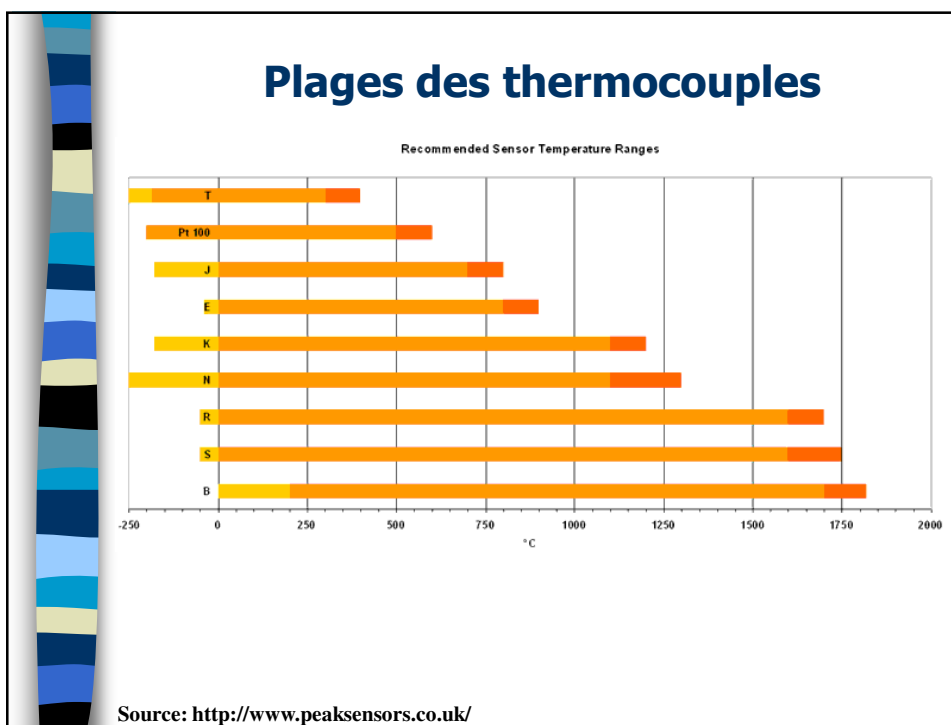
- Comme la F.E.M. dépend de la différence de température entre les 2 jonctions, il faut s'assurer de connaître la température de l'une d'entre elle pour déduire la température de l'autre.
- La jonction dont la température est connue est dite "**jonction de référence**".

Couples thermoélectriques

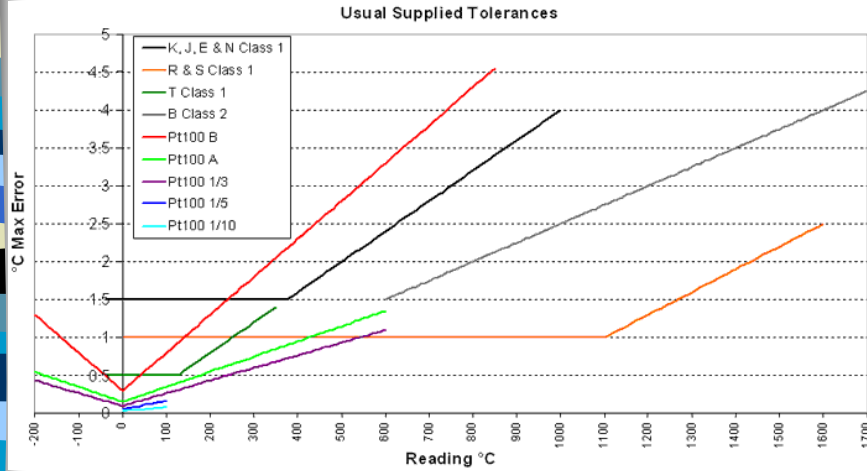
- Avec une jonction à 0 °C, les F.E.M. mesurées varient de -10 à +60 mV.

TYPE E	TYPE J	TYPE K
Nickel-10% Chromium(+) Versus Constantan(-)	Iron(+) Versus Constantan(-)	Nickel-10% Chromium(+) Versus Nickel-5%(-) (Aluminum Silicon)
-100 °C to 1000 °C ± 0.5 °C	0 °C to 760 °C ± 0.1 °C	0 °C to 1370 °C ± 0.7 °C
TYPE R	TYPE S	TYPE T
Platinum-13% Rhodium(+) Versus Platinum(-)	Platinum-10% Rhodium(+) Versus Platinum(-)	Copper(+) Versus Constantan(-)
0 °C to 1000 °C ± 0.5 °C	0 °C to 1750 °C ± 1 °C	-160 °C to 400 °C ± 0.5 °C

APPEL- LATION ISA	MATÉRIAUX DE JONCTION	GAMME DE TEMPÉRATURE NOMINALE °C	ATMOSPHÈRE RECOMMANDÉE	CARACTÉRISTIQUES
B	Platine - 30% Rhodium/ Platine - 6% Rhodium	0 à 1820	Inerte ou oxydante	Facilement contaminé. Utiliser sous gaine non métallique, sans silicates
E	Nickel - 10' Chrome/ Cuivre-Nickel	- 270 à 1000	Vide, inerte ou oxydante	FEM la plus élevée - Dérive plus importante que les autres jonctions métalliques
J	Fer/Cupro-Nickel	- 210 à 760	Vide, inerte, oxydante ou réductrice	Peut rouiller ou devenir fragile à basse température
K	Nickel - 10% Chrome/Nickel - 5% Aluminium et/ou Silicium	- 270 à 1372	Inerte ou oxydante	Le plus linéaire. Vie réduite sous atmosphère légèrement oxydante
R	Platine - 13% Rhodium/ Platine	- 50 à 1768	Inerte ou oxydante	Bonne linéarité à haute température, taille réduite, réponse rapide. Facilement contaminé- utiliser sous gaine.
S	Platine - 10% Rhodium/ Platine	- 50 à 1768	Inerte ou oxydante	Comme le type R
T	Cuivre/Cupro-Nickel	- 270 à 400	Vide, inerte, oxydante ou réductrice	Bon à très basse température . Employé à cause de sa résistance à la corrosion supérieure. Gamme réduite.
-	Tungstène/ Tungstène - 28% Rhénium	- 18 à 2315	Inerte ou vide	Bonne linéarité à haute température, fragile, délicat à manier.
-	Tungstène - 6% Rhénium/ Tungstène- 26% Rhénium	- 18 à 2315	Inerte ou vide	Bonne linéarité à haute température, légèrement moins fragile que le précédent.

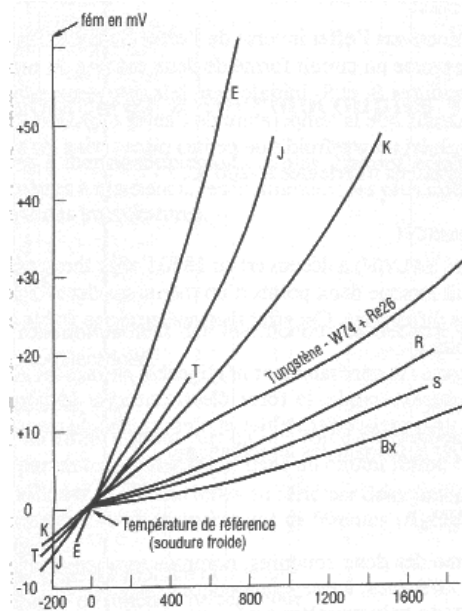


Erreur de mesure des thermocouples



Source: <http://www.peakensors.co.uk/>

Courbes des thermocouples



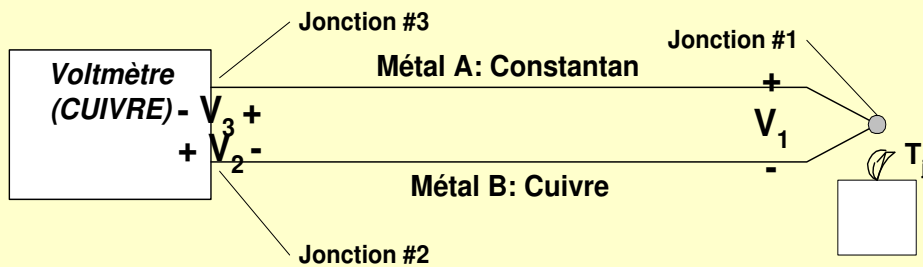
Tables de thermocouples

Tableau 5.4 Température/mV du thermocouple J.

JONCTION DE RÉFÉRENCE: 0 °C, mV = 0

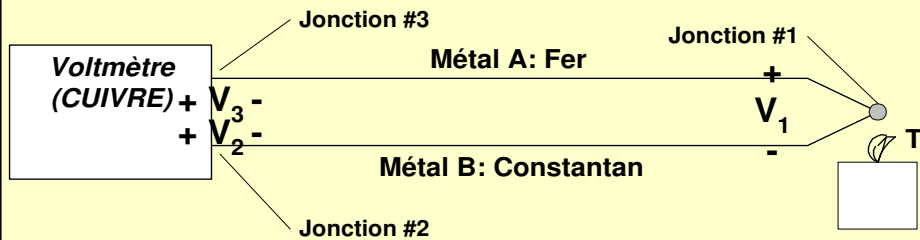
°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV
-210	-8,096	90	4,725	390	21,295	690	38,510	990	57,349
-205	-7,996	95	4,996	395	21,570	695	38,819	995	57,646
-200	-7,890	100	5,268	400	21,846	700	39,130	1000	57,942
-195	-7,778	105	5,540	405	22,122	705	39,442	1005	58,238
-190	-7,659	110	5,812	410	22,397	710	39,754	1010	58,533
-185	-7,533	115	6,085	415	22,673	715	40,068	1015	58,627
-180	-7,402	120	6,359	420	22,949	720	40,382	1020	59,121
-175	-7,265	125	6,633	425	23,225	725	40,697	1025	59,415
-170	-7,122	130	6,907	430	23,501	730	41,013	1030	59,708
-165	-6,974	135	7,182	435	23,777	735	41,329	1035	60,001
-160	-6,821	140	7,457	440	24,054	740	41,647	1040	60,293
-155	-6,663	145	7,732	445	24,330	745	41,965	1045	60,585
-150	-6,499	150	8,008	450	24,607	750	42,283	1050	60,876
-145	-6,331	155	8,284	455	24,884	755	42,602	1055	61,168
-140	-6,159	160	8,560	460	25,161	760	42,922	1060	61,459
-135	-5,962	165	8,837	465	25,438	765	43,242	1065	61,749
-130	-5,801	170	9,113	470	25,716	770	43,563	1070	62,039
-125	-5,615	175	9,390	475	25,994	775	43,885	1075	62,330
-120	-5,426	180	9,667	480	26,272	780	44,207	1080	62,619
-115	-5,233	185	9,944	485	26,551	785	44,529	1085	62,909
-110	-5,036	190	10,222	490	26,829	790	44,852	1090	63,199
-105	-4,836	195	10,499	495	27,109	795	45,175	1095	63,489

Méthode de mesure (type T)



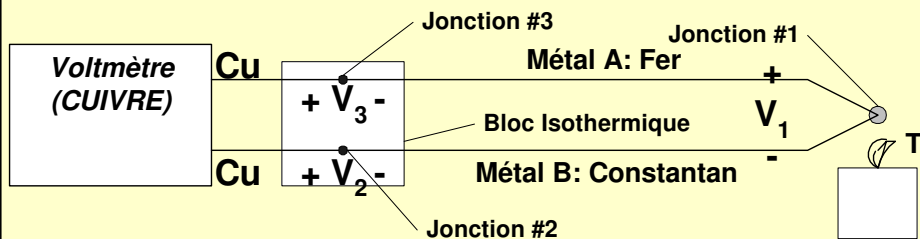
- La jonction 2 ne génère pas de tension.
- La jonction 3 sera la jonction de référence.
- Donc $V_{\text{mesurée}} = V_1 - V_3$

Méthode de mesure (type J)



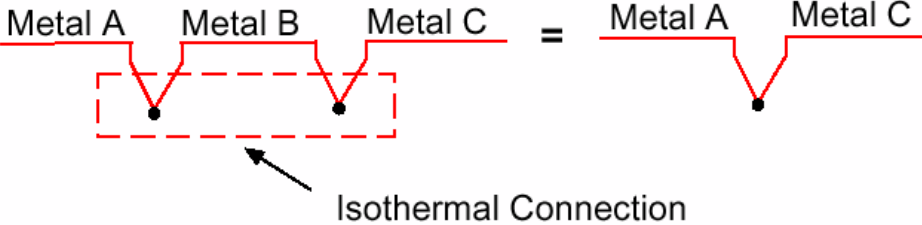
- Les 3 jonctions génèrent une tension.
- Donc $V_{\text{mesurée}} = V_1 + V_3 - V_2$
- Rien ne garanti que les jonctions 2 et 3 sont à la même température.

Méthode de mesure (type J)

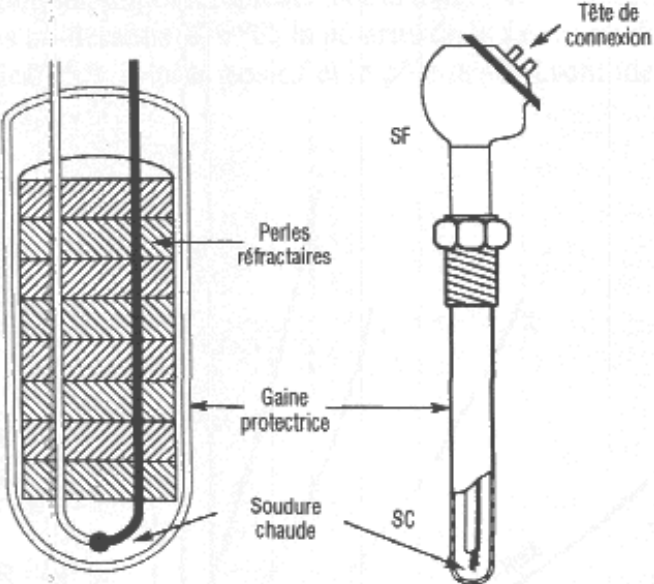


- Le bloc isothermique maintient les jonctions 2 et 3 à la même température.
- Loi des métaux intermédiaires.
- Donc $V_{\text{mesurée}} = V_1 - V_{\text{REF}}$ avec $V_{\text{REF}} = V_2 - V_3$

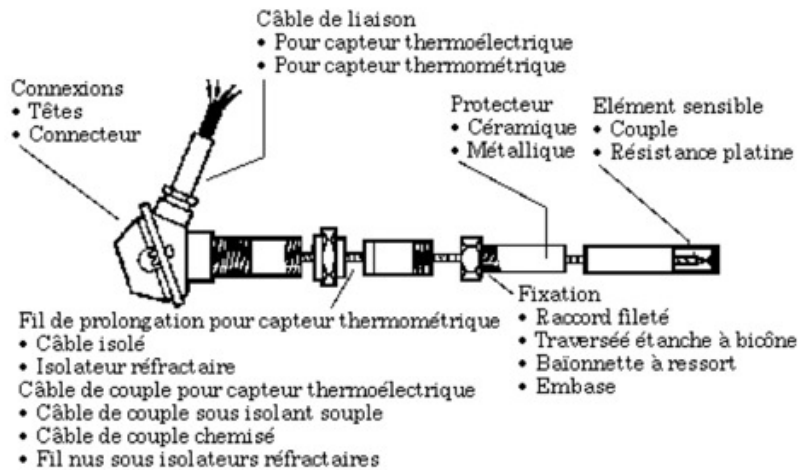
Loi des métaux intermédiaires



Sonde de thermocouple (canne pyrométrique)



Sonde de thermocouple (canne pyrométrique)



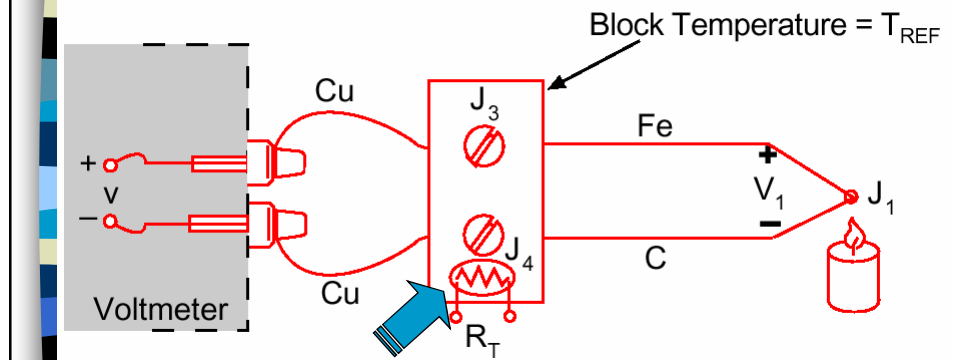
Source: <http://gatt.club.fr/page1/page29/page29.html>

Compensations des thermocouples

- Pour s'assurer que la mesure est de qualité, deux types de compensations de la jonction de référence existent:
 - Compensation "software"
 - Compensation "hardware"

Compensation « software »

- Mesure de la température du bloc isothermique par une sonde RTD (ou une Thermistance).
 - Correction logicielle

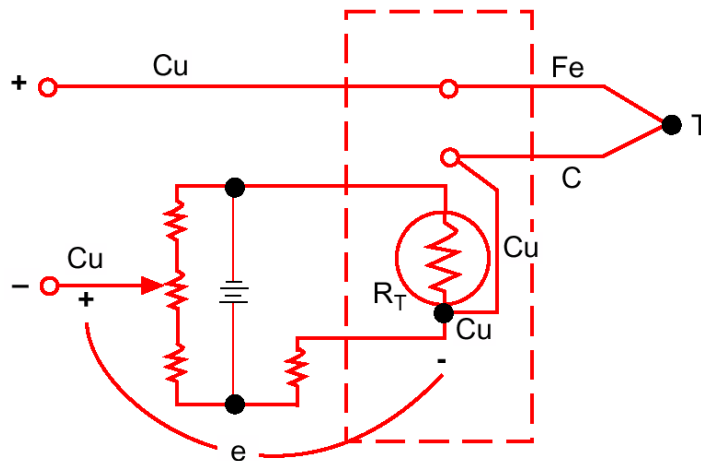


Compensation « software » (2)

- Procédure:
 - (1) Mesurer le RTD et obtenir T_{REF} ;
 - (2) De T_{REF} , déduire la tension V_{REF} ;
 - (3) Mesurer la tension V_M et soustraire V_{REF} pour obtenir V_1 ;
 - (4) De V_1 , déduire T_1 .

Compensation « hardware » (glace électronique)

- Pont de résistances avec source de tension et RTD sur bloc isothermique.



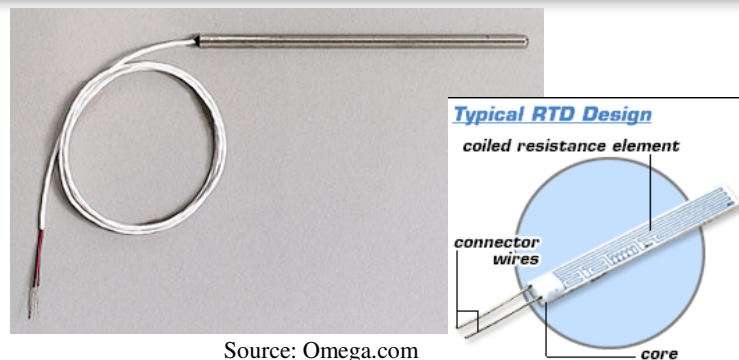
Bilan

- Très grande étendue de mesure de -270 à 2700 °C;
- Précision dans l'ordre de $\pm 0.2 \%$;
- Temps de réponse rapide;
- N'exigent pas d'alimentation extérieure;
- Signaux de faible amplitude;
- Prix modéré.

Code de couleur:



Thermomètres à résistance métallique (RTD)



Principe

- ❖ La résistance d'un conducteur varie avec la température.

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

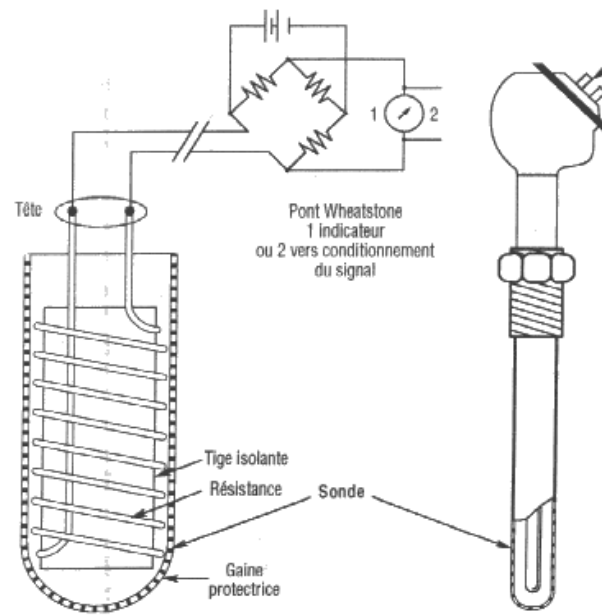
$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha T)$$

Matériaux typiques

	Platine	Cuivre	Nickel	Tungstène
Coefficient de résistance de 0°C à 100°C ($\Omega/^\circ\text{C}$)	0,00385 à 0,003925	0,0042	0,0067	0,0045
Résistivité ($\Omega \text{ cm}$)	$9,81 \times 10^{-6}$	$1,529 \times 10^{-6}$	$5,91 \times 10^{-6}$	$4,99 \times 10^{-6}$
Linéarité en fonction de la température	excellente	excellente	faible	passable
Gamme utile ($^\circ\text{C}$)	-260 à 800	-100 à 150	-100 à 150	-70 à 2700

- Mesure par un pont de Wheatstone

Montage et installation



Montage à 3 fils

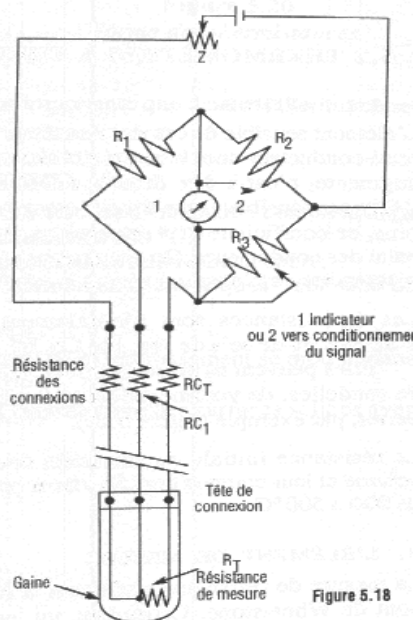


Figure 5.18

Courbe des RTD

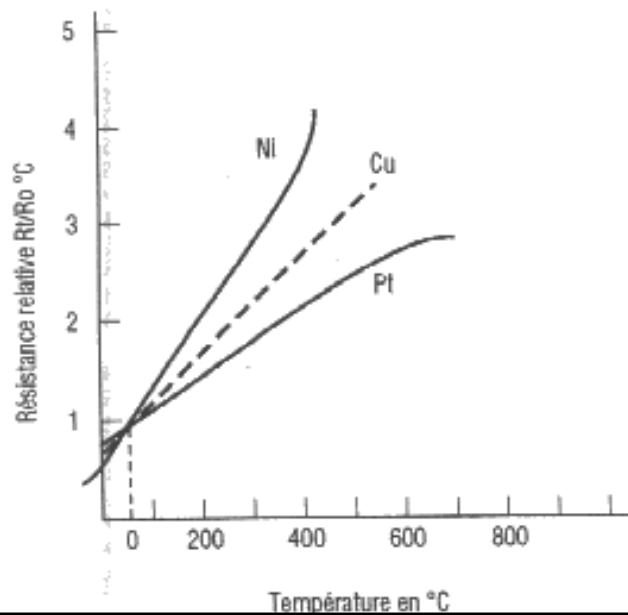
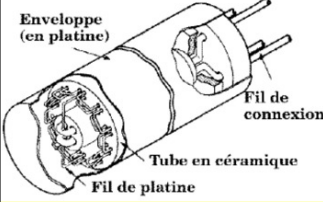


Table du Pt100

RÉSISTANCE NOMINALE À 0 °C = 100 ohm




°C	Ohms	°C	Ohms	°C	Ohms	°C	Ohms
-220	10,41	0	100,00	225	185,00	450	264,14
-215	12,35	5	101,95	230	186,82	455	265,83
-210	14,36	10	103,90	235	188,64	460	267,52
-205	16,43	15	105,85	240	190,46	465	269,21
		20	107,79	245	192,27	470	270,89
-200	18,53	25	109,73	250	194,08	475	272,57
-195	20,65	30	111,67	255	195,89	480	274,25
-190	22,78	35	113,61	260	197,70	485	275,92
-185	24,92	40	115,54	265	199,50	490	277,60
-180	27,05	45	117,47	270	201,30	495	279,27
-175	29,17	50	119,40	275	203,09	500	280,93
-170	31,28	55	121,32	280	204,88	505	282,60
-165	33,38	60	123,24	285	206,68	510	284,26
-160	35,48	65	125,16	290	208,46	515	285,91
-155	37,57	70	127,07	295	210,25	520	287,57
-150	39,65	75	128,98	300	212,03	525	289,22
-145	41,73	80	130,89	305	213,81	530	290,87
-140	43,80	85	132,80	310	215,58	535	292,51
-135	45,87	90	134,70	315	217,36	540	294,16
-130	47,93	95	136,60	320	219,13	545	295,80
-125	49,99	100	138,50	325	220,90	550	297,43
-120	52,04	105	140,39	330	222,66	555	299,07
-115	54,09	110	142,28	335	224,42	560	300,70
-110	56,13	115	144,18	340	226,18	565	302,33
-105	58,17	120	146,06	345	227,94	570	303,95
-100	60,20	125	147,94	350	229,69	575	305,58
-95	62,23	130	149,82	355	231,44	580	307,20
-90	64,25	135	151,70	360	233,19	585	308,81
-85	66,27	140	153,57	365	234,93	590	310,43
-80	68,28	145	155,45	370	236,67	595	312,04
-75	70,29	150	157,32	375	238,41	600	313,65
-70	72,29	155	159,18	380	240,15	605	315,25
-65	74,29	160	161,04	385	241,88	610	316,86
-60	76,28	165	162,90	390	243,61	615	318,46
-55	78,27	170	164,76	395	245,34	620	320,05
-50	80,25	175	166,62	400	247,06	625	321,65
-45	82,23	180	168,47	405	248,78	630	323,24
-40	84,21	185	170,32	410	250,50	635	324,83
-35	86,19	190	172,16	415	252,21	640	326,41
-30	88,17	195	174,00	420	253,93	645	327,99
-25	90,15	200	175,84	425	255,64	650	329,57
-20	92,13	205	177,68	430	257,34	655	331,15
-15	94,10	210	179,51	435	259,05	660	332,72
-10	96,07	215	181,34	440	260,75	665	334,29
-5	98,04	220	183,17	445	262,45	670	335,86

Source: <http://gatt.club.fr/page1/page29/page29.html>

Bilan

- Bonnes reproductibilité, stabilité et interchangeabilité;
- Précision de $\pm 0.2 \%$;
- Temps de réponse de 0.5 à 5 secondes;
- Influencable par l'humidité et les gaz corrosifs;
- Effet Joule perturbant la mesure.

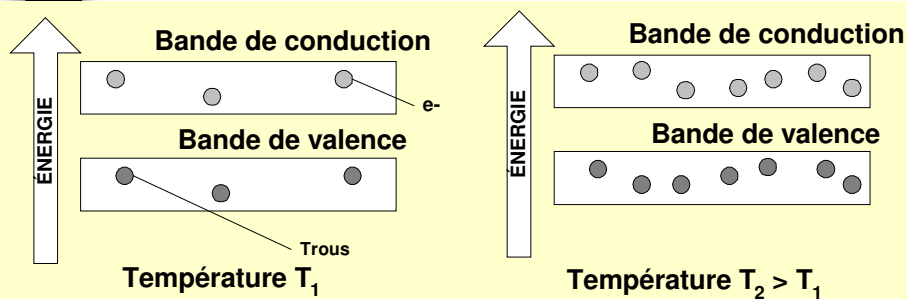
Tables chez Minco: 

Thermomètres à semi-conducteurs (Thermistance)



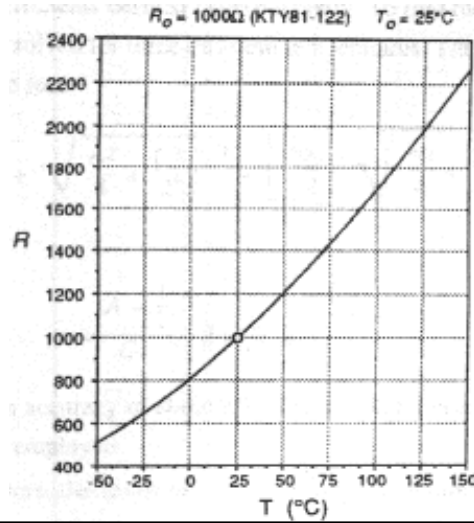
Principe

- ❖ Variation de la résistance d'un semi-conducteur avec T , dû au fait que le nombre de couples électron-trou augmente, ce qui diminue la résistivité.



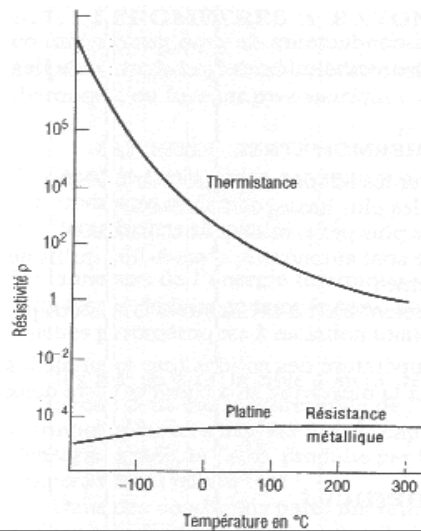
Courbe d'une Thermistance

- ... à coefficient de température positif (CTP)



Courbe d'une Thermistance

- ... à coefficient de température négatif (CTN)



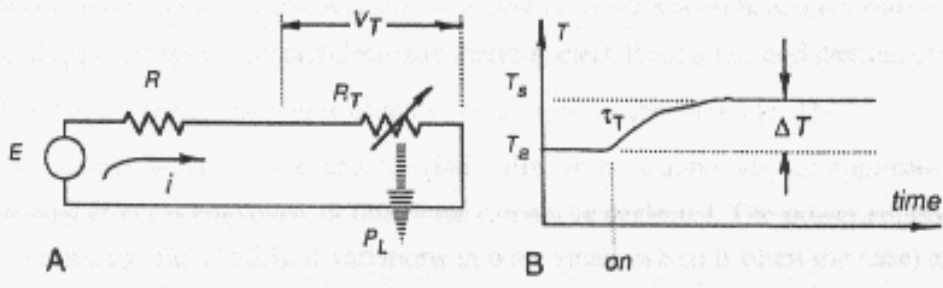
Équation de Steinhart-Hart

- Approximation de la courbe d'une thermistance:
 - T en °K

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R_T + C \ln^3 R_T$$

L'auto-échauffement

- Peut mener à une destruction du capteur (CTN).



Bilan

- Étendues de mesure de -110 à +250 °C
- Circuits miniatures, donc temps de réponse très courts;
- précision de l'ordre de $\pm 0.1 \%$;
- Échelle non-linéaire et étendue réduite;
- Problème d'auto-échauffement (CTN).

Pyromètres optiques

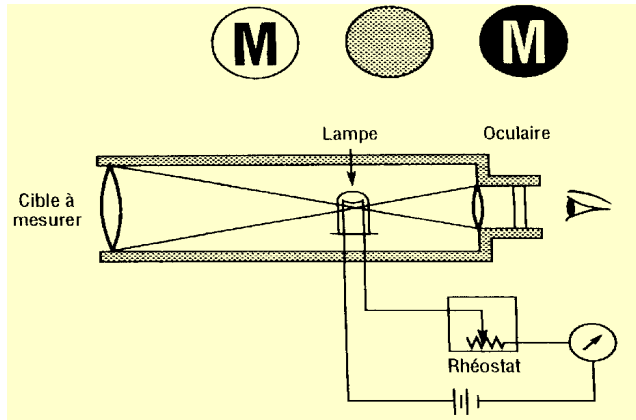


Raytek®

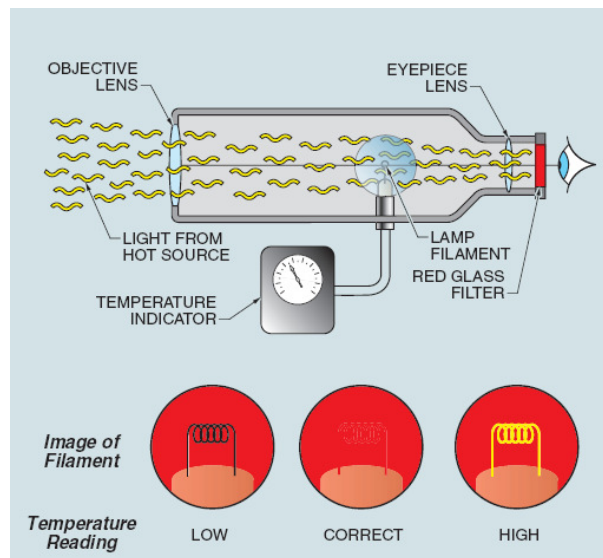
IR thermometers
being measured, the
moving parts, while
The Raytek MiniTemp
the same features found
ter is perfect for auto en
home improvement projec
and doors, monitoring cri
or workshop, or ensuring th
comfortable and safe.
Just pull the trigger! The Mi
the temperature in an inset
display. The simple to use
becomes even easier to op
the laser point (MT4). The
thermometer: Smart, Simp

Principe

- Comparaison entre la brillance d'une lampe étalon et la source de radiation thermique.



Principe

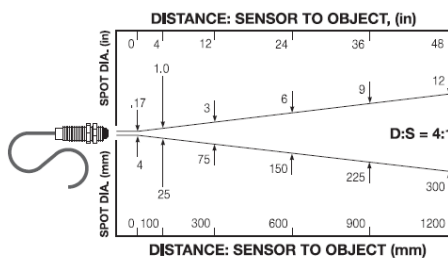


Types de pyromètres optiques

- Si au point focal, on retrouve:
 - Un thermocouple ou un RTD:
 - Pyromètre à radiation totale.
 - Oeil humain:
 - Pyromètre à disparition de filament.
 - Capteur photovoltaïque:
 - Pyromètre à capteur photoélectrique.

Spécifications

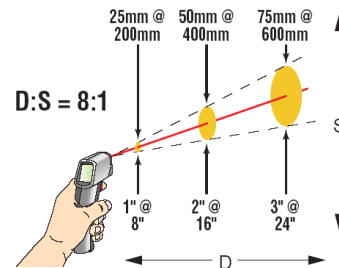
Nominal Optical Specifications



D:S is the optical resolution expressed as a ratio of the distance to the resolution spot divided by the diameter of the spot.

Optical resolution for the CI sensor is 4:1. Nominal spot size based on 90% energy.

Optical Resolution

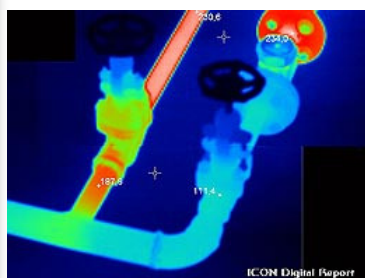
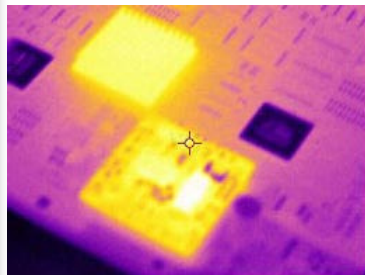


The MiniTemp thermometer is intended for close range targets, measuring a minimum target area of 1 inch in diameter out to a distance of approximately 8 inches, and has a 6 inch target measurement area at 4 feet.

Bilan

- Plage de 300 à 3000 °C;
- Précision de ± 5 °C (dépend de l'utilisateur);
 - Meilleur au niveau des pyromètres électroniques.
- Fonctionnement automatique possible.
 - Capteur infrarouge avec thermocouple.

Imagerie thermique



Pyromètres à dilatation de solide

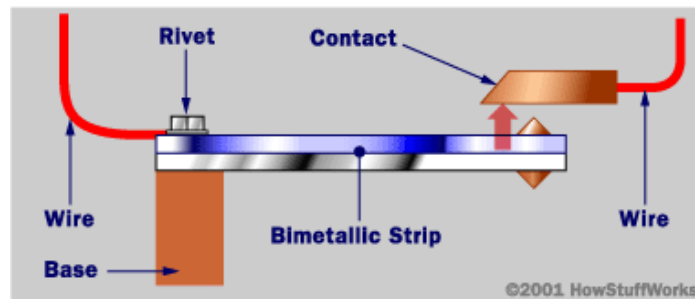
- Existe en deux versions:
 - Pyromètre à tige (mesure de la dilatation d'une tige):
 - Mesure jusqu'à 1000 °C.
 - Pyromètre à bilame: (voir thermostat à bilame).
 - Mesure de -50 à +500 °C, précision de $\pm 1\%$.

Thermostats à dilatation de solide (ou bilames)



Principe

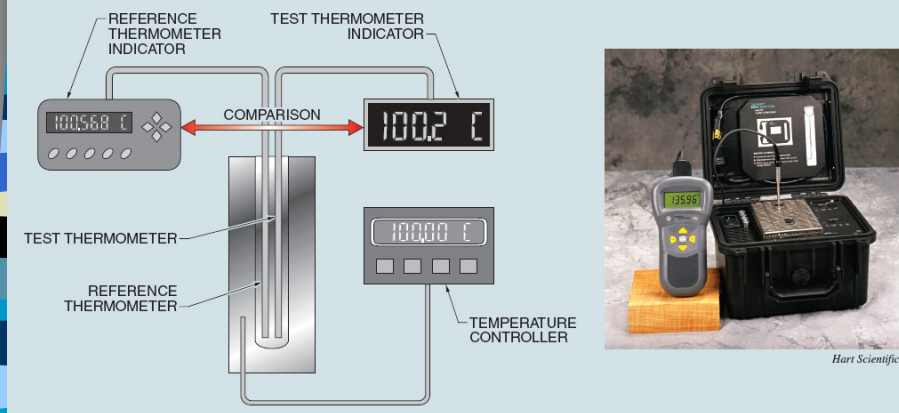
- Deux métaux ayant des coefficients de dilatation thermique différents sont soudés ensemble.
- Flexion du bilame si la température change.



Bilan

- Système de mesure simple et courant;
- Mesure de -50°C à 500°C ;
- Volume réduit;
- Précision de $\pm 1\%$.

Aspect calibration



Aspect calibration

