

Les thermocouples

Généralités

Dans un circuit fermé constitué de deux conducteurs de nature différente, il circule un courant lorsqu'on maintient entre les deux jonctions une différence de température. Ce phénomène, lié à l'effet Peltier¹ (Inverse de l'effet Seebeck¹), est utilisé pour la réalisation de sondes thermométriques très précises. La force électromotrice qui apparaît dans le circuit dépend de la nature des deux conducteurs et des températures des deux jonctions: celles-ci sont appelées respectivement soudure chaude et soudure froide. Une des jonctions est en général maintenue à une température de référence (par exemple 0 °C), l'autre servant de capteur.

Le thermocouple le plus précis est constitué de platine et d'un alliage platine + 10% de rhodium (couple Le Chatelier); la sensibilité est de l'ordre de 10 microvolts par degré. D'autres couples métalliques fournissent jusqu'à 70 microvolts par degré, mais les jonctions entre des corps tels que tellure ou bismuth, ainsi que les couples formés de cristaux de germanium dopés n et p, délivrent des forces électromotrices beaucoup plus considérables; ils sont toutefois difficilement manipulables. Le thermocouple le plus réfractaire (utilisable jusqu'à 2 800 °C) est formé de tungstène et d'un alliage de tungstène et de 26% de rhénium. Dans le domaine cryogénique, on peut atteindre 1 K (environ) avec certains couples, formés, par exemple, d'alliages or-cobalt

Historique

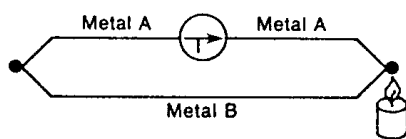
En 1822-1823, Thomas Seebeck décrit, dans un mémoire à l'Académie des sciences de Prusse, un phénomène qui correspond bien à la découverte du courant thermoélectrique se produisant dans un circuit fermé, formé de conducteurs différents et dont les jonctions sont à des températures différentes.

L'explication par Seebeck de ce phénomène est erronée, mais les classements de matériaux qu'il a établis en fonction de ce que, actuellement, on nomme le pouvoir thermoélectrique sont tout à fait corrects. Seebeck ne manque pas de noter le phénomène provoqué par une différence de température le long d'un conducteur homogène; ce phénomène sera redécouvert trente ans plus tard par William Thomson.

Vers 1834, Jean Charles Athanase Peltier publie dans les Annales de physique et chimie un article sur les anomalies de température observées aux jonctions de conducteurs de nature différente. Les expériences de Peltier sont confirmées, en 1838, par Antoine-César Becquerel et surtout Heinrich Lenz, mais les explications de Peltier concernant le phénomène découvert sont incorrectes.

Il faut attendre 1857 pour avoir, avec Thomson, une vue d'ensemble convenable des trois effets thermoélectriques (effet Peltier, effet Seebeck et effet Thomson) et une formulation encore admise aujourd'hui. Le calcul des propriétés des circuits thermoélectriques a été, pour la première fois, effectué d'une manière satisfaisante par E. Altenkirch en 1909.

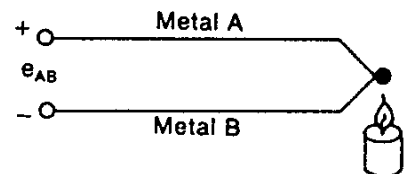
Explications



Lorsque deux fils composés de métaux différents sont raccordés à leurs extrémités et que l'une d'elles est chauffée, il se produit une circulation de courant continu dans le circuit. C'est l'effet Thermoélectrique.

Si on coupe le circuit, la tension apparaissant est fonction de la température et de la composition des deux métaux.

Tous les métaux dissemblables présentent cet effet.



Après des recherches de linéarité, de valeur de tension et de gamme de température, les combinaisons les plus courantes sont

Premier métal	Second Métal	Symboles	Type	Limite en °C	Force électromotrice en μV
Cuivre (Cu)	Constantan (C)	Cu/C	T	-192 à +400	4277 à 100 °C
Fer (Fe)	Constantan (C)	Fe/C	J	-194 à +870	27390 à 500 °C
Chromel (Cr)	Constantan (C)	Cr/C	E	+1000 °C	37000 à 500 °C
Chromel (Cr)	Alumel (Al)	Cr/Al	K	+1370	41310 à 1000 °C
Platine (Pt)	Rhodium (Rh)	Pt/Rh	S R B	+1700	10450 à 1000 °C

Pour de petits changements de température, la variation de tension est proportionnelle à la variation de température : $\Delta e_{AB} = \Delta \alpha T$ - - α est appelé: coefficient de Seebeck.

Un des thermocouples le plus utilisé est le Chromel-Alumel ou Thermocouple de Type K. Il possède une plage de mesure étendue (-100 à + 1370 °C), une force électromotrice importante (41310 μ V à 1000 °C avec soudure froide à 0°C) et une courbe que l'on sait très bien linéariser pour obtenir sur toute l'étendue de mesure des précisions meilleures que 0,2%.

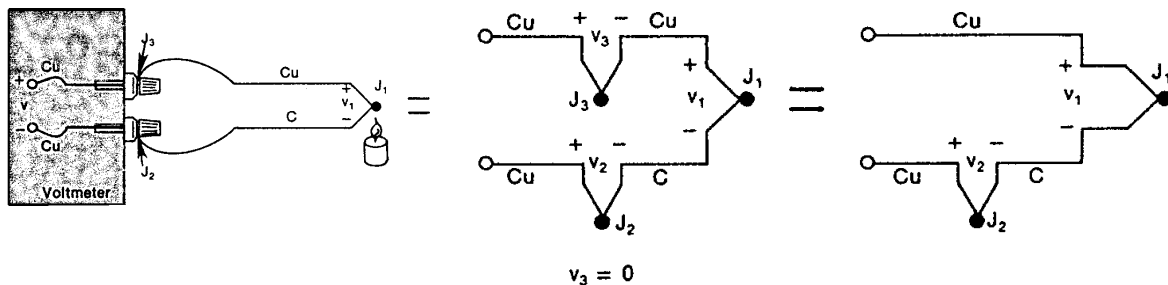
ALUMEL - Alliage composé de 95% de nickel, 2% d'aluminium, 2% de manganèse et 1% de silicium.

CHROMEL - Alliage composé de 80% de nickel et 20% de Chrome.

MESURE DES TENSIONS DE THERMOCOUPLE

On ne peut pas mesurer directement les tensions des thermocouples car le simple fait de le connecter sur un voltmètre crée des nouveaux thermocouples par les liaisons entre les fils du thermocouple et les bornes en cuivre ou en laiton du voltmètre.

Exemple avec un thermocouple cuivre-constantan (Cu/C) :



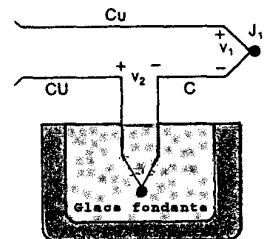
Nous voulons que le voltmètre lise seulement la tension générée par le thermocouple J1, c'est-à-dire V1 mais nous avons créé deux autres jonctions métalliques J2 et J3. Comme J3 est une liaison cuivre sur cuivre, il n'y a pas de création d'effet thermoélectrique. En revanche, J2 est une liaison cuivre constantan qui ajoute la tension V2 en opposition avec V1.

La lecture sur le voltmètre sera proportionnelle à la différence de température entre J1 et J2.

Nous ne pourrions connaître la température de J1 que si nous connaissons d'abord celle de J2.

RÉFÉRENCE DE LA JONCTION EXTERNE

Une manière de déterminer exactement et facilement la température de la jonction J2 est de la plonger celle-ci dans un bain de glace fondante, ce qui force sa température à 0°C, et alors, on pourra considérer J2 comme étant la jonction de référence.



Le schéma a donc maintenant une référence 0°C sur J2.

La lecture du voltmètre devient: $V = (V1 - V2)$ équivalent à $\alpha (t_{j1} - t_{j2})$.

Écrivons la formule avec des degrés Celsius : $T_{j1} (°C) + 273,15 = t_{j1}$

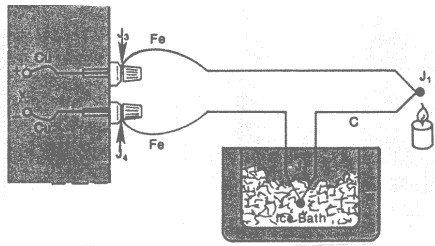
$$\begin{aligned} V = V1 - V2 &= \alpha [(t_{j1} + 273,15) - (t_{j2} + 273,15)] \\ &= \alpha (T_{j1} - T_{j2}) \\ &= \alpha (T_{j1} - 0) \\ &= \alpha T_{j1} \end{aligned}$$

Nous avons utilisé ce raisonnement pour souligner que la tension V2 de la jonction J2, dans le bain de glace, **n'est pas zéro volt**. C'est une fonction de la température absolue.

Cette méthode est très précise car la température 0°C (Point de fusion de la glace), peut être facilement et précisément contrôlée.

Le point de fusion de la glace est utilisé par les organismes de normalisation comme point de référence fondamental pour leurs tables de tension de thermocouple. Ainsi, à la lecture de ces tables, nous pourrions convertir directement la tension V1 en température Tj1.

L'exemple du thermocouple Cuivre/Constantan (Type T) est d'une utilisation facile pour les démonstrations car le cuivre est également le métal des bornes du voltmètre.

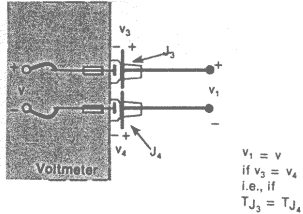


Faisons le même exemple avec un thermocouple Fer/Constantan (Type J) à la place du Cuivre/Constantan.

Le nombre de jonctions métalliques dissemblables augmente.

La mesure reste précise si les bornes Hi et Lo (J3 et J4) restent à la même température.

Dans ce cas, les deux tensions V3 et V4 sont identiques et s'annulent.

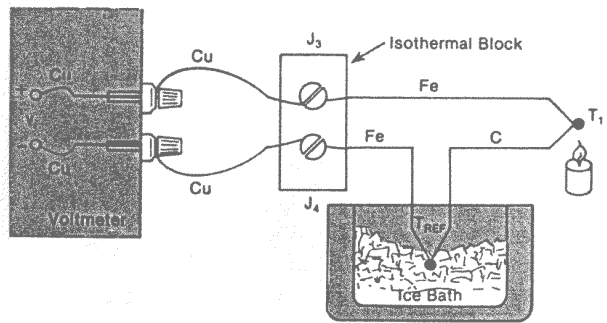


ANNULLATION DES TENSIONS DE JONCTION

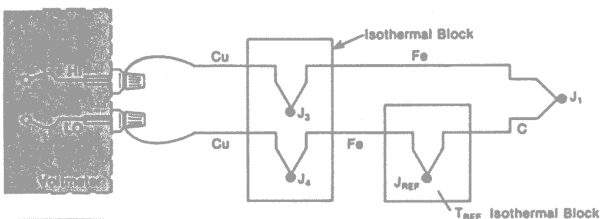
Si les deux bornes de mesure ne sont pas à la même température, il y aura une erreur d'autant plus importante que la différence de température entre les deux bornes sera importante.

Afin de minimiser les erreurs, les fils en cuivre de liaison avec le voltmètre doivent être connectés sur un bloc de jonction isothermique qui est un isolant électrique mais un très bon conducteur de la chaleur.

Il sert à garder J3 et J4 à la même température. De ce fait, les deux jonctions Cuivre/Fer (J3 et J4) génèrent des tensions identiques mais en opposition et nous aurons toujours $V = \alpha (T_1 - T_{ref})$



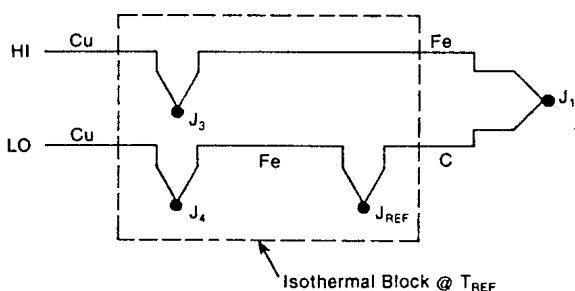
ÉLIMINATION DU BAIN DE GLACE



Remplaçons le bain de glace par un autre bloc isothermique.

Le nouveau bloc isothermique est à la température Tref et, parce que J3 et J4 sont toujours à la même température, nous pouvons toujours écrire : $V = \alpha (T_1 - T_{ref})$

Ce circuit présente l'inconvénient de connecter 2 thermocouples. Modifions une première fois le circuit.

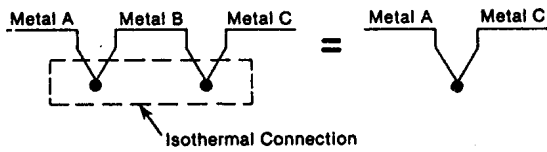


La tension de sortie n'a toujours pas changé :

$$V = \alpha (T_1 - T_{ref})$$

Appliquons maintenant une loi empirique (Vérifiée expérimentalement). Cette loi dit:

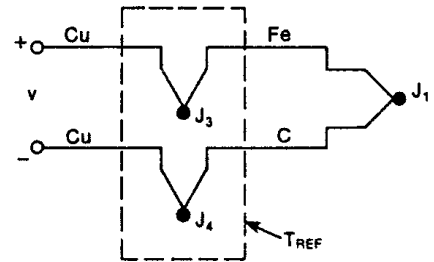
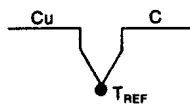
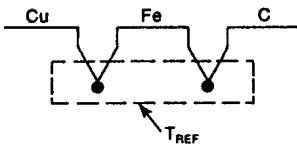
Un troisième métal inséré entre les deux métaux dissemblables d'une jonction thermocouple n'aura aucun effet sur la tension de sortie tant que les deux jonctions formées par le métal additionnel seront à la même température.



Cette conclusion est très intéressante car elle élimine complètement le besoin du fil de fer (Fe) sur l'entrée Lo du Voltmètre.

Thus the low lead

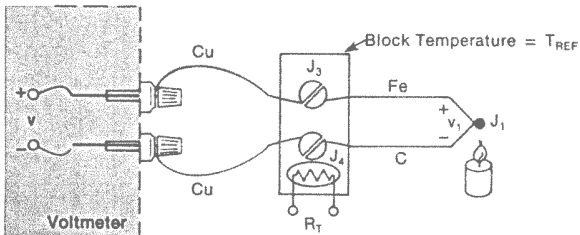
Becomes:



Et $V = \alpha (T_{j1} - T_{ref})$ ou α est le coefficient du thermocouple Fer/Constantan.

Les deux jonctions J3 et J4 deviennent maintenant la Jonction de référence et nous allons procéder à l'étape logique suivante :

Mesurer directement la température du bloc isothermique et utiliser cette information pour calculer la température Tj1.



Une thermistance (RT) dont la valeur ohmique est fonction de la température est un des moyens de mesurer la température du bloc isothermique.

La thermistance (RT) et les jonctions J3 et J4 sont à la même température grâce à la conception du bloc isothermique.

1. On mesure la thermistance RT pour calculer Tref, puis on converti Tref en tension équivalente de jonction Vref.
2. On mesure V auquel on soustrait Vref pour obtenir V1, puis on converti V1 en température Tj1.

Cette procédure est appelée **Compensation Logicielle** (Software Compensation) car elle utilise des calculs pour compenser l'effet induit par la jonction de référence.

La mesure de température du bloc isothermique peut être réalisée grâce à un capteur ayant une fonction de transfert proportionnelle à la température comme une sonde platine, une thermistance ou un capteur de température en circuit intégré.

Il semble logique de poser la question suivante:

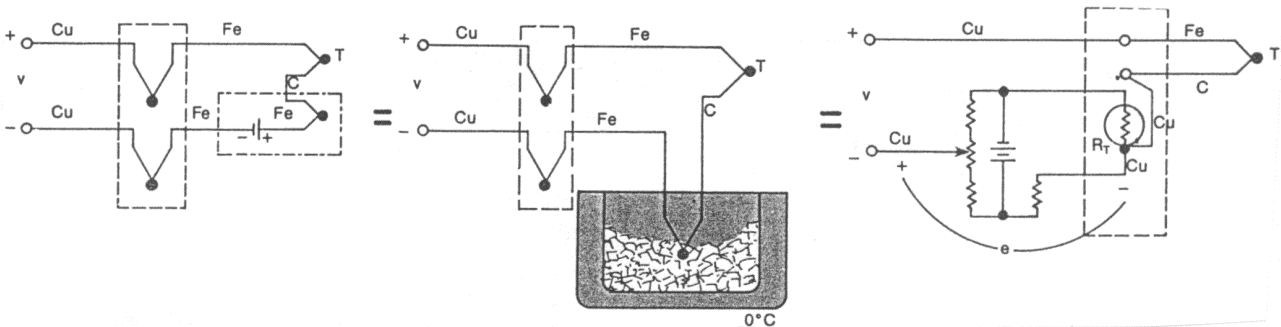
Nous utilisons un matériel (Thermistance, sonde platine ou circuit intégré) déjà capable de mesurer une température, pourquoi alors utiliser un thermocouple qui nécessite une compensation de la jonction de référence ?

La réponse est simple. Les thermistances, sondes platine ou circuit intégré ont des plages de mesure limitées ; Les thermocouples ont des plages très étendues, peuvent être de formes très diverses, et même serrés sous des vis.

En résumé, les thermocouples sont les moyens de mesure de température les plus universels et, la compensation logicielle est non seulement la plus simple à mettre en œuvre mais aussi la plus efficace.

COMPENSATION MATÉRIELLE (HARDWARE COMPENSATION)

Plutôt que de mesurer la température de la jonction de référence et calculer sa tension équivalente, nous pourrions mettre une pile (ou un générateur de tension) dans le circuit pour annuler la tension de décalage de la jonction de référence afin de considérer celle-ci comme étant à 0°C.

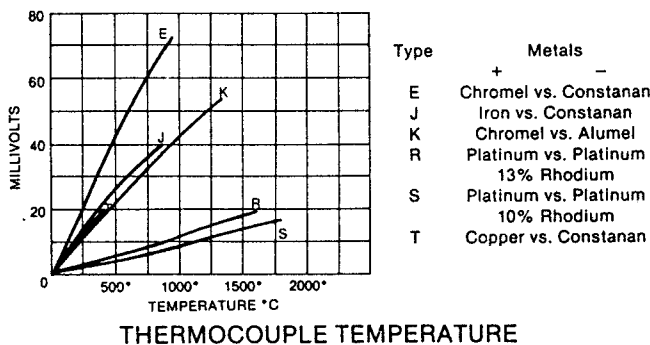


La tension de compensation e est fonction de la température du capteur R_T . La tension V est maintenant référencée à 0°C et peut être lue et convertie par les tables standards.

CONVERSION TENSION -> TEMPÉRATURE

Maintenant que nous utilisons soit la compensation logicielle, soit la compensation matérielle, afin d'obtenir une jonction de référence à 0°C, nous devons convertir la tension V mesurée en température.

Malheureusement, les relations entre tension et température des thermocouples ne sont pas linéaires.



THERMOCOUPLE TEMPERATURE vs. VOLTAGE GRAPH
Figure 16

Relation Tension-Température

À la lecture de ces courbes, on ne peut que vérifier que les thermocouples sont des appareils non linéaires.

On peut voir que le thermocouple de type K (Chromel/Alumel) est presque linéaire entre 0°C et 1000°C. Il pourra être utilisé avec une bonne précision, en calculant simplement un facteur d'échelle.

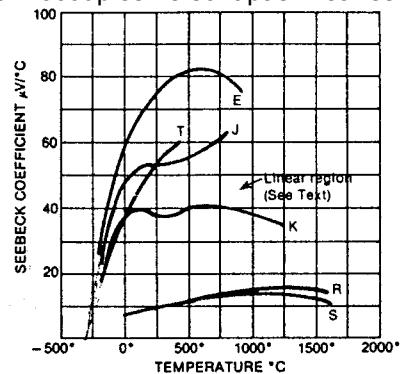
Pour obtenir les valeurs des températures en fonction des tensions lues, nous pourrions entrer les tables **NBTT (National Bureau of Standards Thermocouples Tables)** dans un ordinateur, mais cela entraînerait des très gros fichiers de données et des temps de recherche prohibitifs.

Une approche plus viable est d'utiliser des fonctions polynomiales de puissances croissantes telles que:

$$T = a_0 + (a_1)x + (a_2)x^2 + (a_3)x^3 + (a_4)x^4 + \dots + (a_n)x^n$$

Avec: T = Température
 x = Tension du thermocouple
 a = Coefficients uniques pour chaque thermocouple
 n = Ordre maximum du polynôme

Si on accroît n , la précision augmente. Par exemple, avec $n=9$ la précision est d'environ 1 °C. Cette précision dépend du type de thermocouple utilisé.



SEEBECK COEFFICIENT vs. TEMPERATURE
Figure 17

Coefficient de Seebeck (α)

Table des différents coefficients en fonction du type de thermocouple et pour les plages de mesure.

	Type E	Type J	Type K	Type R	Type S	Type T
	Nickel 10% Chrome (+) et Constantan (-)	Fer (+) et Constantan (-)	Nickel 20% Chrome (+) et Nickel 5% Al/Mg/Si (-)	Platine 13% Rhodium (+) et Platine (-)	Platine 10% Rhodium (+) et Platine (-)	Cuivre (+) et Constantan (-)
	-100 °C à 1000°C ± 0.5 °C au 9 ^e ordre	0 °C à 760°C ± 0.1 °C au 5 ^e ordre	0 °C à 1370 °C ± 0.7 °C au 8 ^e ordre	0 °C à 1000 °C ± 0.5 °C au 8 ^e ordre	0 °C à 1750 °C ± 1 °C au 9 ^e ordre	-160 °C à 400 °C ± 0.5 °C au 7 ^e ordre
a0	0.104967248	-0.048868252	0.226584602	0.263632917	0.927763167	0.100860910
a1	17189.45282	19873.14503	24152.10900	179075.491	169526.5150	25727.94369
a2	-282639.0850	-218614.5353	67233.4248	-48840341.37	-31568363.94	-767345.8295
a3	12695339.5	11569199.78	2210340.682	1.90002E +10	8990730663	78025595.81
a4	-448703084.6	-264917531.4	-860963914.9	-4.82704E +12	-1.63565E +12	-9247486589
a5	1.10866E +10	2018441314	4.83506E +10	7.62091E +14	1.88027E +14	6.97688E +11
a6	-1.76807E +11		-1.18452E +12	-7.20026E +16	-1.37241E +16	-2.66192E +13
a7	1.71842E +12		1.38690E +13	3.71496E +18	6.17501E +17	3.94078E +14
a8	-9.19278E +12		-6.33708E +13	-8.03104E +19	-1.56105E +19	
a9	2.06132E +13				1.69535E +20	

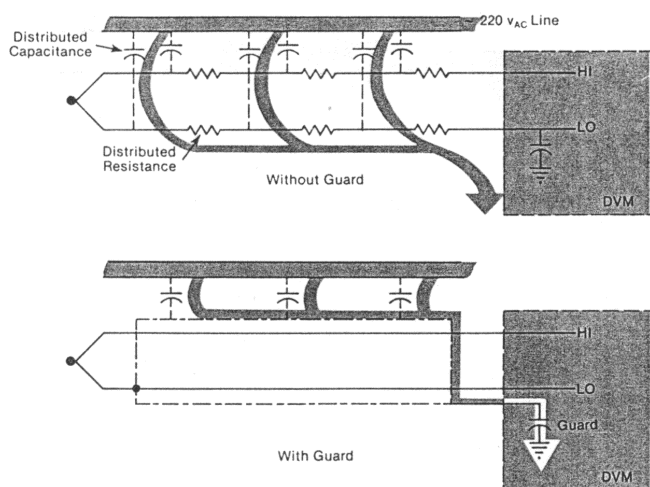
SENSIBILITÉ DU MOYEN DE MESURE

Pour les thermocouples de type K (Chromel/Alumel), le voltmètre doit être capable de mesurer 4 µV pour détecter une variation de 0,1 °C. Ces faibles amplitudes des signaux sont la porte ouverte aux parasites et bruits électriques.

Pour cette raison, les instruments de mesure doivent utiliser des techniques très poussées de réjection de bruit.

RÉJECTION DU BRUIT ET TECHNIQUES DE GARDE

La garde (Guard) des moyens de mesure et le blindage des lignes de thermocouples doivent être utilisés afin de minimiser les effets parasites dus aux bruits électriques.



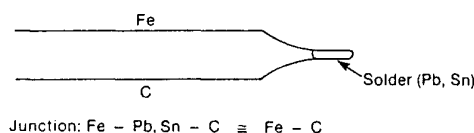
Les bruits sont induits sur les fils des thermocouples et faussent les mesures.

Les bruits sont captés par le blindage et évacués par la garde du voltmètre.

PRÉCAUTIONS DE CABLAGE

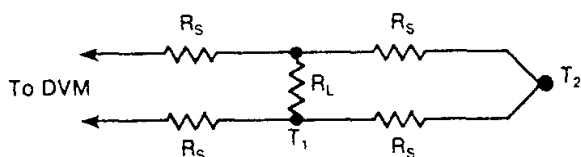
Il y a plusieurs manières de connecter les deux fils d'un thermocouple.

- Soudure à l'étain
- Soudure à l'argent
- Soudure électrique sans apport de métal
- Brasure
- Interpénétration des deux métaux par forte pression
- Interpénétration des deux métaux par choc



Dans le cas de soudure avec apport de métal, nous introduisons un troisième métal. Ceci n'a aucune importance tant que les deux jonctions sont à la même température (Voir loi empirique du troisième métal).

ISOLEMENT ENTRE LES DEUX FILS



Les fils composant un thermocouple n'ont pas une résistance ohmique nulle. Dans le cas de grande longueur et de résistance linéaire non négligeable, il est important de soigner l'isolement entre les deux fils.

La résistance série (R_s) peut devenir importante alors que la résistance d'isolement peut être faible. Dans ce cas, la jonction thermocouple se situera à R_L et V deviendra proportionnel à la température T_1 , pas à T_2 .

RÉSISTANCE DE LIGNE

Les fils constituant un thermocouple n'ont pas une résistance ohmique nulle. La table suivante donne les valeurs de résistance de ligne en Ω (ohm) par pied (double fil)¹ à 25°C en fonction du type de thermocouple et de la jauge (gauge) des fils.

Jauge		Type K	Type J	Type T	Type E	Type S	Type R	Type C	Type G	Type D
AWG No.	Diamètre (inches)	Chromel/ Alumel	Fer/ Constantan	Cuivre/ Constantan	Chromel/ Contantan	Pt/ Pt10%Rh	Pt/ Pt13%Rh	W5%Re/ W26%Re	W/ W26%Re	W3%Re/ W25%Re
6	0.162	0.023	0.014	0.012	0.027	0.007	0.007	0.009	0.008	0.009
8	0.128	0.037	0.022	0.019	0.044	0.011	0.011	0.015	0.012	0.015
10	0.102	0.058	0.034	0.029	0.069	0.018	0.018	0.023	0.020	0.022
12	0.081	0.091	0.054	0.046	0.109	0.028	0.029	0.037	0.031	0.035
14	0.064	0.146	0.087	0.074	0.175	0.045	0.047	0.058	0.049	0.055
16	0.051	0.230	0.137	0.117	0.276	0.071	0.073	0.092	0.078	0.088
18	0.040	0.374	0.222	0.190	0.448	0.116	0.119	0.148	0.126	0.138
20	0.032	0.586	0.357	0.298	0.707	0.185	0.190	0.235	0.200	0.220
24	0.0201	1.490	0.878	0.7526	1.78	0.464	0.478	0.594	0.560	0.560
26	0.0159	2.381	1.405	1.204	2.836	0.740	0.760	0.945	0.803	0.890
30	0.0100	5.984	3.551	3.043	7.169	1.85	1.91	2.38	2.03	2.26
32	0.0080	9.524	5.599	4.758	11.31	1.96	3.04	3.8	3.22	3.60
34	0.0063	15.17	8.946	7.66	18.09	4.66	4.82	6.04	5.10	5.70
36	0.0050	24.08	14.20	12.17	28.76	7.40	7.64	9.6	8.16	9.10
38	0.0039	38.20	23.35	19.99	45.41	11.6	11.95	15.3	12.9	15.3
40	0.00315	60.88	37.01	31.64	73.57	18.6	19.3	24.4	20.6	23.0
44	0.0020	149.6	88.78	76.09	179.2	74.0	76.5	60.2	51.1	56.9
50	0.0010	598.4	355.1	304.3	716.9	185	191	240	204	227
56	0.00049	2408	1420	1217	2876	740	764	1000	850	945

Normalement, si la liaison entre les fils est correcte, la valeur ohmique de la résistance de ligne n'a aucune influence sur la mesure de la température.

Cependant, dans certains cas, il est nécessaire de connaître, en détail, le circuit électronique effectuant la mesure de la tension de thermocouple. En effet, certains circuits d'entrée sont conçus pour détecter des coupures ou des courts-circuits de ligne.

Dans ce dessein, une tension est injectée, par l'intermédiaire de résistances, sur les extrémités de la ligne et le circuit résultant se comporte alors comme un pont diviseur fonction de la résistance de ligne.

Les spécifications des constructeurs doivent donner les valeurs ohmiques des résistances de ligne des thermocouples.

¹ Cela signifie que la valeur comprend la résistance de la totalité de la ligne thermocouple et ne doit pas être multiplié par deux.

Table des tensions de Thermocouple Type K (Chromel/Alumel)												
Tension thermoélectrique en millivolts avec jonction de référence à 0°C												
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
-270	-6,458											-270
-260	-6,441	-6,444	-6,446	-6,448	-6,450	-6,452	-6,453	-6,455	-6,456	-6,457	-6,458	-260
-250	-6,404	-6,408	-6,413	-6,417	-6,421	-6,425	-6,429	-6,432	-6,435	-6,438	-6,441	-250
-240	-6,344	-6,351	-6,358	-6,364	-6,371	-6,377	-6,382	-6,388	-6,394	-6,399	-6,404	-240
-230	-6,262	-6,271	-6,280	-6,289	-6,297	-6,306	-6,314	-6,322	-6,329	-6,337	-6,344	-230
-220	-6,158	-6,170	-6,181	-6,192	-6,202	-6,213	-6,223	-6,233	-6,243	-6,253	-6,262	-220
-210	-6,035	-6,048	-6,061	-6,074	-6,087	-6,099	-6,111	-6,123	-6,135	-6,147	-6,158	-210
-200	-5,891	-5,907	-5,922	-5,936	-5,951	-5,965	-5,980	-5,994	-6,007	-6,021	-6,035	-200
-190	-5,730	-5,747	-5,763	-5,780	-5,796	-5,813	-5,829	-5,845	-5,860	-5,876	-5,891	-190
-180	-5,550	-5,569	-5,587	-5,606	-5,624	-5,642	-5,660	-5,678	-5,695	-5,712	-5,730	-180
-170	-5,354	-5,374	-5,394	-5,414	-5,434	-5,454	-5,474	-5,493	-5,512	-5,531	-5,550	-170
-160	-5,141	-5,163	-5,185	-5,207	-5,228	-5,249	-5,271	-5,292	-5,313	-5,333	-5,354	-160
-150	-4,912	-4,936	-4,959	-4,983	-5,006	-5,029	-5,051	-5,074	-5,097	-5,119	-5,141	-150
-140	-4,669	-4,694	-4,719	-4,743	-4,768	-4,792	-4,817	-4,841	-4,865	-4,889	-4,912	-140
-130	-4,410	-4,437	-4,463	-4,489	-4,515	-4,541	-4,567	-4,593	-4,618	-4,644	-4,669	-130
-120	-4,138	-4,166	-4,193	-4,221	-4,248	-4,276	-4,303	-4,330	-4,357	-4,384	-4,410	-120
-110	-3,852	-3,881	-3,910	-3,939	-3,968	-3,997	-4,025	-4,053	-4,082	-4,110	-4,138	-110
-100	-3,553	-3,584	-3,614	-3,644	-3,674	-3,704	-3,734	-3,764	-3,793	-3,823	-3,852	-100
-90	-3,242	-3,274	-3,305	-3,337	-3,368	-3,399	-3,430	-3,461	-3,492	-3,523	-3,553	-90
-80	-2,920	-2,953	-2,985	-3,018	-3,050	-3,082	-3,115	-3,147	-3,179	-3,211	-3,242	-80
-70	-2,586	-2,620	-2,654	-2,687	-2,721	-2,754	-2,788	-2,821	-2,854	-2,887	-2,920	-70
-60	-2,243	-2,277	-2,312	-2,347	-2,381	-2,416	-2,450	-2,484	-2,518	-2,552	-2,586	-60
-50	-1,889	-1,925	-1,961	-1,996	-2,032	-2,067	-2,102	-2,137	-2,173	-2,208	-2,243	-50
-40	-1,527	-1,563	-1,600	-1,636	-1,673	-1,709	-1,745	-1,781	-1,817	-1,853	-1,889	-40
-30	-1,156	-1,193	-1,231	-1,268	-1,305	-1,342	-1,379	-1,416	-1,453	-1,490	-1,527	-30
-20	-0,777	-0,816	-0,854	-0,892	-0,930	-0,968	-1,005	-1,043	-1,081	-1,118	-1,156	-20
-10	-0,392	-0,431	-0,469	-0,508	-0,547	-0,585	-0,624	-0,662	-0,701	-0,739	-0,777	-10
- 0	0,000	-0,039	-0,079	-0,118	-0,157	-0,197	-0,236	-0,275	-0,314	-0,353	-0,392	- 0
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,199	0,238	0,277	0,317	0,357	0,397	0
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758	0,798	10
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,162	1,203	20
30	1,203	1,244	1,285	1,325	1,366	1,407	1,448	1,489	1,529	1,570	1,611	30
40	1,611	1,652	1,693	1,734	1,776	1,817	1,858	1,899	1,940	1,981	2,022	40
50	2,022	2,064	2,105	2,146	2,188	2,229	2,270	2,312	2,353	2,394	2,436	50
60	2,436	2,477	2,519	2,560	2,601	2,643	2,684	2,726	2,767	2,809	2,850	60
70	2,850	2,892	2,933	2,975	3,016	3,058	3,100	3,141	3,183	3,224	3,266	70
80	3,266	3,307	3,349	3,390	3,432	3,473	3,515	3,556	3,598	3,639	3,681	80
90	3,681	3,722	3,764	3,805	3,847	3,888	3,930	3,971	4,012	4,054	4,095	90
100	4,095	4,137	4,178	4,219	4,261	4,302	4,343	4,384	4,426	4,467	4,508	100
110	4,508	4,549	4,590	4,632	4,673	4,714	4,755	4,796	4,837	4,878	4,919	110
120	4,919	4,960	5,001	5,042	5,083	5,124	5,164	5,205	5,246	5,287	5,327	120
130	5,327	5,368	5,409	5,450	5,490	5,531	5,571	5,612	5,652	5,693	5,733	130
140	5,733	5,774	5,814	5,855	5,895	5,936	5,976	6,016	6,057	6,097	6,137	140
150	6,137	6,177	6,218	6,258	6,298	6,338	6,378	6,419	6,459	6,499	6,539	150
160	6,539	6,579	6,619	6,659	6,699	6,739	6,779	6,819	6,859	6,899	6,939	160
170	6,939	6,979	7,019	7,059	7,099	7,139	7,179	7,219	7,259	7,299	7,338	170
180	7,338	7,378	7,418	7,458	7,498	7,538	7,578	7,618	7,658	7,697	7,737	180
190	7,737	7,777	7,817	7,857	7,897	7,937	7,977	8,017	8,057	8,097	8,137	190
200	8,137	8,177	8,216	8,256	8,296	8,336	8,376	8,416	8,456	8,497	8,537	200
210	8,537	8,577	8,617	8,657	8,697	8,737	8,777	8,817	8,857	8,898	8,938	210
220	8,938	8,978	9,018	9,058	9,099	9,139	9,179	9,220	9,260	9,300	9,341	220
230	9,341	9,381	9,421	9,462	9,502	9,543	9,583	9,624	9,664	9,705	9,745	230
240	9,745	9,786	9,826	9,867	9,907	9,948	9,989	10,029	10,070	10,111	10,151	240
250	10,151	10,192	10,233	10,274	10,315	10,355	10,396	10,437	10,478	10,519	10,560	250
260	10,560	10,600	10,641	10,682	10,723	10,764	10,805	10,846	10,887	10,928	10,969	260
270	10,969	11,010	11,051	11,093	11,134	11,175	11,216	11,257	11,298	11,339	11,381	270
280	11,381	11,422	11,463	11,504	11,546	11,587	11,628	11,669	11,711	11,752	11,793	280

Table des tensions de Thermocouple Type K (Chromel/Alumel)												
Tension thermoélectrique en millivolts avec jonction de référence à 0°C												
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
290	11,793	11,835	11,876	11,918	11,959	12,000	12,042	12,083	12,125	12,166	12,207	290
300	12,207	12,249	12,290	12,332	12,373	12,415	12,456	12,498	12,539	12,581	12,623	300
310	12,623	12,664	12,706	12,747	12,789	12,831	12,872	12,914	12,955	12,997	13,039	310
320	13,039	13,080	13,122	13,164	13,205	13,247	13,289	13,331	13,372	13,414	13,456	320
330	13,456	13,497	13,539	13,581	13,623	13,665	13,706	13,748	13,790	13,832	13,874	330
340	13,874	13,915	13,957	13,999	14,041	14,083	14,125	14,167	14,208	14,250	14,292	340
350	14,292	14,334	14,376	14,418	14,460	14,502	14,544	14,586	14,628	14,670	14,712	350
360	14,712	14,754	14,796	14,838	14,880	14,922	14,964	15,006	15,048	15,090	15,132	360
370	15,132	15,174	15,216	15,258	15,300	15,342	15,384	15,426	15,468	15,510	15,552	370
380	15,552	15,594	15,636	15,679	15,721	15,763	15,805	15,847	15,889	15,931	15,974	380
390	15,974	16,016	16,058	16,100	16,142	16,184	16,227	16,269	16,311	16,353	16,395	390
400	16,395	16,438	16,480	16,522	16,564	16,607	16,649	16,691	16,733	16,776	16,818	400
410	16,818	16,860	16,902	16,945	16,987	17,029	17,072	17,114	17,156	17,199	17,241	410
420	17,241	17,283	17,326	17,368	17,410	17,453	17,495	17,537	17,580	17,622	17,664	420
430	17,664	17,707	17,749	17,792	17,834	17,876	17,919	17,961	18,004	18,046	18,088	430
440	18,088	18,131	18,173	18,216	18,258	18,301	18,343	18,385	18,428	18,470	18,513	440
450	18,513	18,555	18,598	18,640	18,683	18,725	18,768	18,810	18,853	18,895	18,938	450
460	18,938	18,980	19,023	19,065	19,108	19,150	19,193	19,235	19,278	19,320	19,363	460
470	19,363	19,405	19,448	19,490	19,533	19,576	19,618	19,661	19,703	19,746	19,788	470
480	19,788	19,831	19,873	19,916	19,959	20,001	20,044	20,086	20,129	20,172	20,214	480
490	20,214	20,257	20,299	20,342	20,385	20,427	20,470	20,512	20,555	20,598	20,640	490
500	20,640	20,683	20,725	20,768	20,811	20,853	20,896	20,938	20,981	21,024	21,066	500
510	21,066	21,109	21,152	21,194	21,237	21,280	21,322	21,365	21,407	21,450	21,493	510
520	21,493	21,535	21,578	21,621	21,663	21,706	21,749	21,791	21,834	21,876	21,919	520
530	21,919	21,962	22,004	22,047	22,090	22,132	22,175	22,218	22,260	22,303	22,346	530
540	22,346	22,388	22,431	22,473	22,516	22,559	22,601	22,644	22,687	22,729	22,772	540
550	22,772	22,815	22,857	22,900	22,942	22,985	23,028	23,070	23,113	23,156	23,198	550
560	23,198	23,241	23,284	23,326	23,369	23,411	23,454	23,497	23,539	23,582	23,624	560
570	23,624	23,667	23,710	23,752	23,795	23,837	23,880	23,923	23,965	24,008	24,050	570
580	24,050	24,093	24,136	24,178	24,221	24,263	24,306	24,348	24,391	24,434	24,476	580
590	24,476	24,519	24,561	24,604	24,646	24,689	24,731	24,774	24,817	24,859	24,902	590
600	24,902	24,944	24,987	25,029	25,072	25,114	25,157	25,199	25,242	25,284	25,327	600
610	25,327	25,369	25,412	25,454	25,497	25,539	25,582	25,624	25,666	25,709	25,751	610
620	25,751	25,794	25,836	25,879	25,921	25,964	26,006	26,048	26,091	26,133	26,176	620
630	26,176	26,218	26,260	26,303	26,345	26,387	26,430	26,472	26,515	26,557	26,599	630
640	26,599	26,642	26,684	26,726	26,769	26,811	26,853	26,896	26,938	26,980	27,022	640
650	27,022	27,065	27,107	27,149	27,192	27,234	27,276	27,318	27,361	27,403	27,445	650
660	27,445	27,487	27,529	27,572	27,614	27,656	27,698	27,740	27,783	27,825	27,867	660
670	27,867	27,909	27,951	27,993	28,035	28,078	28,120	28,162	28,204	28,246	28,288	670
680	28,288	28,330	28,372	28,414	28,456	28,498	28,540	28,583	28,625	28,667	28,709	680
690	28,709	28,751	28,793	28,835	28,877	28,919	28,961	29,002	29,044	29,086	29,128	690
700	29,128	29,170	29,212	29,254	29,296	29,338	29,380	29,422	29,464	29,505	29,547	700
710	29,547	29,589	29,631	29,673	29,715	29,756	29,798	29,840	29,882	29,924	29,965	710
720	29,965	30,007	30,049	30,091	30,132	30,174	30,216	30,257	30,299	30,341	30,383	720
730	30,383	30,424	30,466	30,508	30,549	30,591	30,632	30,674	30,716	30,757	30,799	730
740	30,799	30,840	30,882	30,924	30,965	31,007	31,048	31,090	31,131	31,173	31,214	740
750	31,214	31,256	31,297	31,339	31,380	31,422	31,463	31,504	31,546	31,587	31,629	750
760	31,629	31,670	31,712	31,753	31,794	31,836	31,877	31,918	31,960	32,001	32,042	760
770	32,042	32,084	32,125	32,166	32,207	32,249	32,290	32,331	32,372	32,414	32,455	770
780	32,455	32,496	32,537	32,578	32,619	32,661	32,702	32,743	32,784	32,825	32,866	780
790	32,866	32,907	32,948	32,990	33,031	33,072	33,113	33,154	33,195	33,236	33,277	790
800	33,277	33,318	33,359	33,400	33,441	33,482	33,523	33,564	33,604	33,645	33,686	800
810	33,686	33,727	33,768	33,809	33,850	33,891	33,931	33,972	34,013	34,054	34,095	810
820	34,095	34,136	34,176	34,217	34,258	34,299	34,339	34,380	34,421	34,461	34,502	820
830	34,502	34,543	34,583	34,624	34,665	34,705	34,746	34,787	34,827	34,868	34,909	830
840	34,909	34,949	34,990	35,030	35,071	35,111	35,152	35,192	35,233	35,273	35,314	840

Table des tensions de Thermocouple Type K (Chromel/Alumel)												
Tension thermoélectrique en millivolts avec jonction de référence à 0°C												
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
850	35,314	35,354	35,395	35,435	35,476	35,516	35,557	35,597	35,637	35,678	35,718	850
860	35,718	35,758	35,799	35,839	35,880	35,920	35,960	36,000	36,041	36,081	36,121	860
870	36,121	36,162	36,202	36,242	36,282	36,323	36,363	36,403	36,443	36,483	36,524	870
880	36,524	36,564	36,604	36,644	36,684	36,724	36,764	36,804	36,844	36,885	36,925	880
890	36,925	36,965	37,005	37,045	37,085	37,125	37,165	37,205	37,245	37,285	37,325	890
900	37,325	37,365	37,405	37,445	37,484	37,524	37,564	37,604	37,644	37,684	37,724	900
910	37,724	37,764	37,803	37,843	37,883	37,923	37,963	38,002	38,042	38,082	38,122	910
920	38,122	38,162	38,201	38,241	38,281	38,320	38,360	38,400	38,439	38,479	38,519	920
930	38,519	38,558	38,598	38,638	38,677	38,717	38,756	38,796	38,836	38,875	38,915	930
940	38,915	38,954	38,994	39,033	39,073	39,112	39,152	39,191	39,231	39,270	39,310	940
950	39,310	39,349	39,388	39,428	39,467	39,507	39,546	39,585	39,627	39,664	39,703	950
960	39,703	39,743	39,782	39,821	39,861	39,900	39,939	39,979	40,018	40,057	40,096	960
970	40,096	40,136	40,175	40,214	40,253	40,292	40,332	40,371	40,410	40,449	40,488	970
980	40,488	40,527	40,566	40,605	40,645	40,684	40,723	40,762	40,801	40,840	40,879	980
990	40,879	40,918	40,957	40,996	41,035	41,074	41,113	41,152	41,191	41,230	41,269	990
1000	41,269	41,308	41,347	41,385	41,424	41,463	41,502	41,541	41,580	41,619	41,657	1000
1010	41,657	41,696	41,739	41,774	41,813	41,851	41,890	41,929	41,968	42,006	42,045	1010
1020	42,045	42,084	42,123	42,161	42,200	42,239	42,277	42,316	42,355	42,393	42,432	1020
1030	42,432	42,470	42,509	42,548	42,586	42,625	42,663	42,702	42,740	42,779	42,817	1030
1040	42,817	42,856	42,894	42,933	42,971	43,010	43,048	43,087	43,125	43,164	43,202	1040
1050	43,202	43,240	43,279	43,317	43,356	43,394	43,432	43,471	43,509	43,547	43,585	1050
1060	43,585	43,624	43,662	43,700	43,739	43,777	43,815	43,853	43,891	43,930	43,968	1060
1070	43,968	44,006	44,044	44,082	44,121	44,159	44,197	44,235	44,273	44,311	44,349	1070
1080	44,349	44,387	44,425	44,463	44,501	44,539	44,577	44,615	44,653	44,691	44,729	1080
1090	44,729	44,767	44,805	44,843	44,881	44,919	44,957	44,995	45,033	45,070	45,108	1090
1100	45,108	45,146	45,184	45,222	45,260	45,297	45,335	45,373	45,411	45,448	45,486	1100
1110	45,486	45,524	45,561	45,599	45,637	45,675	45,712	45,750	45,787	45,825	45,863	1110
1120	45,863	45,900	45,938	45,975	46,013	46,051	46,088	46,126	46,163	46,201	46,238	1120
1130	46,238	46,275	46,313	46,350	46,388	46,425	46,463	46,500	46,537	46,575	46,612	1130
1140	46,612	46,649	46,687	46,724	46,761	46,799	46,836	46,873	46,910	46,948	46,985	1140
1150	46,985	47,022	47,059	47,096	47,134	47,171	47,208	47,245	47,282	47,319	47,356	1150
1160	47,356	47,393	47,430	47,468	47,505	47,542	47,579	47,616	47,653	47,689	47,726	1160
1170	47,726	47,763	47,800	47,837	47,874	47,911	47,948	47,985	48,021	48,058	48,095	1170
1180	48,095	48,132	48,169	48,205	48,242	48,279	48,316	48,352	48,389	48,426	48,462	1180
1190	48,462	48,499	48,536	48,572	48,609	48,645	48,682	48,718	48,755	48,792	48,828	1190
1200	48,828	48,865	48,901	48,937	48,974	49,010	49,047	49,083	49,120	49,156	49,192	1200
1210	49,192	49,229	49,265	49,301	49,338	49,374	49,410	49,446	49,483	49,519	49,555	1210
1220	49,555	49,591	49,627	49,663	49,700	49,736	49,772	49,808	49,844	49,880	49,916	1220
1230	49,916	49,952	49,988	50,024	50,060	50,096	50,132	50,168	50,204	50,240	50,276	1230
1240	50,276	50,311	50,347	50,383	50,419	50,455	50,491	50,526	50,562	50,598	50,633	1240
1250	50,633	50,669	50,705	50,741	50,776	50,812	50,847	50,883	50,919	50,954	50,990	1250
1260	50,990	51,025	51,061	51,096	51,132	51,167	51,203	51,238	51,274	51,309	51,344	1260
1270	51,344	51,380	51,415	51,450	51,486	51,521	51,556	51,592	51,627	51,662	51,697	1270
1280	51,697	51,733	51,768	51,803	51,838	51,873	51,908	51,943	51,979	52,014	52,049	1280
1290	52,049	52,084	52,119	52,154	52,189	52,224	52,259	52,294	52,329	52,364	52,398	1290
1300	52,398	52,433	52,468	52,503	52,538	52,573	52,608	52,642	52,677	52,712	52,747	1300
1310	52,747	52,781	52,816	52,851	52,886	52,920	52,955	52,989	53,024	53,059	53,093	1310
1320	53,093	53,128	53,162	53,197	53,232	53,266	53,301	53,335	53,370	53,404	53,439	1320
1330	53,439	53,473	53,507	53,542	53,576	53,611	53,645	53,679	53,714	53,748	53,782	1330
1340	53,782	53,817	53,851	53,885	53,920	53,954	53,988	54,022	54,057	54,091	54,125	1340
1350	54,125	54,159	54,193	54,228	54,262	54,296	54,330	54,364	54,398	54,432	54,466	1350
1360	54,466	54,501	54,535	54,569	54,603	54,637	54,671	54,705	54,739	54,773	54,807	1360
1370	54,807	54,841	54,875									1370

ⁱ Physicien français, Jean Charles Athanase Peltier est né à Ham (Somme) le 22 février 1785 et mort à Paris le 27 octobre 1845. Après avoir abandonné sa profession d'horloger à l'âge de trente ans, il se consacra à la recherche en physique; il est connu pour sa découverte en 1834 de l'effet Peltier: lorsqu'un courant électrique passe à une jonction connectant deux conducteurs, on observe une augmentation ou une baisse de température selon le sens du courant, la quantité de chaleur dégagée ou absorbée étant proportionnelle à l'intensité du courant. C'est, en quelque sorte, l'inverse de l'effet Seebeck. Le passage d'un courant peut donc absorber de la chaleur; on utilise cet effet dans certains petits réfrigérateurs ou pour le refroidissement de circuits électriques.

ⁱⁱ Thomas Johann Seebeck (1770-1831) est le premier à avoir mis en évidence les effets thermoélectriques (production de courants) qui se manifestent dans un circuit constitué de deux métaux dont les deux soudures se trouvent à des températures différentes.