

Les thermocouples

1. Constitution des thermocouples

Le thermocouple se compose de deux fils de métaux différents. Les fils sont soudés pour former la pointe de mesure ou jonction. C'est une jonction métal-métal. La tension de sortie V est mesurée entre les deux fils et est indiquée sur la figure II.1. La tension V est petite et varie en fonction de la température des métaux (ou alliages) A et B.

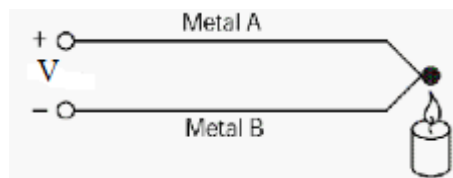


Figure II.1 Schémas de principe du thermocouple

Un circuit à thermocouple a au moins deux jonctions: la jonction de mesure et une jonction de référence. En règle générale, la jonction de référence est créée là où les deux fils se connectent à l'appareil de mesure. Cette deuxième jonction c'est vraiment deux jonctions: une pour chacun des deux fils, mais parce qu'elles sont supposées être à la même température (isotherme), elles sont considérées comme une seule jonction (thermique). C'est le point où les métaux passent des métaux de thermocouple à ceux des métaux qui sont utilisés dans l'appareil de mesure (généralement le cuivre).

La tension de sortie V est liée à la différence de température entre la température T_1 de la jonction (soudée) et la température T_2 des jonctions de référence (isotherme) par :

$$V = S \Delta T$$

Avec S le coefficient de Seebeck exprimé en $V/^\circ C$

$$\Delta T = T_j - T_{ref}$$

T_j : température de la jonction en $^\circ C$, et T_{ref} en $^\circ C$ est la température de référence qui doit être connue. En générale on prend $T_{ref} = 0^\circ C$.

La variation de V est linéaire lorsque ΔT est petit. Si ΔT n'est pas petit la variation de V en fonction de la température est non linéaire.

Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Seebeck. L'effet Seebeck génère une petite tension sur la longueur d'un fil, et est plus grande là où le gradient de température est le plus élevé.

* Si le circuit est en fil de matériau identique, ils généreront des tensions Seebeck (càd des tensions dues à l'effet Seebeck) identiques mais opposés qui s'annuleront.

* Cependant, si les fils métalliques sont différentes, les tensions Seebeck seront différentes et n'annuleront pas.

En réalité la tension Seebeck est constituée de deux composantes: la tension Peltier (due à l'effet Peltier) générée aux jonctions, plus la tension Thomson (due à l'effet Thomson) générée dans les fils par le gradient de température.

La tension Peltier est proportionnelle à la température de chaque jonction tandis que la tension Thomson est proportionnelle au carré de la différence de température entre les deux jonctions. C'est la tension Thomson qui constitue l'essentiel de la tension obtenue. C'est la tension Thomson et qui est à l'origine de la non-linéarité observée dans la réponse du thermocouple.

Chaque type de thermocouple a sa courbe de tension Seebeck caractéristique. La courbe dépend des métaux, de leur pureté, de leur homogénéité et leur structure cristalline. Dans le cas des alliages, le rapport des constituants et leur répartition dans le fil sont également importants. Ces caractéristiques potentiellement inhomogènes du métal expliquent pourquoi les thermocouples à fil épais peuvent être plus précis dans les applications à haute température, lorsque les métaux du thermocouple et leurs impuretés deviennent plus mobile par diffusion.

2. Les considérations pratiques des thermocouples

La théorie ci-dessus du fonctionnement des thermocouples a d'importantes implications pratiques qui valent la peine d'être comprises:

* **1.** Un troisième métal peut être introduit dans un circuit de thermocouple et n'a aucun impact, à condition que les deux extrémités soient même température. Cela signifie que la jonction de mesure du thermocouple peut être soudée, brasée ou soudée sans affecter l'étalonnage du thermocouple, tant qu'il n'y a pas de gradient de température net le long du troisième métal.

De plus, si le métal du circuit de mesure (généralement le cuivre) est différent de celui du thermocouple, à condition que la température des deux bornes de connexion soit identique et connue, la lecture ne sera pas affectée par la présence du fil de cuivre.

* 2. La sortie du thermocouple est générée par le gradient de température le long des fils et non aux jonctions comme communément cru. Par conséquent, il est important que la qualité du fil soit maintenue là où les gradients de température existent. La qualité du fil peut être compromise par la contamination de son environnement d'exploitation et du matériau isolant. Pour des températures inférieures à $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, la contamination des fils isolés n'est généralement pas un problème. À des températures supérieures $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, le choix des matériaux d'isolation et de gaine, ainsi que l'épaisseur du fil, deviennent critiques pour l'étalonnage et la stabilité du thermocouple.

*3. La tension générée par un thermocouple est fonction de la différence de température entre la jonction de mesure et la jonction de référence. Traditionnellement, la jonction de référence était maintenue à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ par un bain de glace comme le montre la figure II.2.

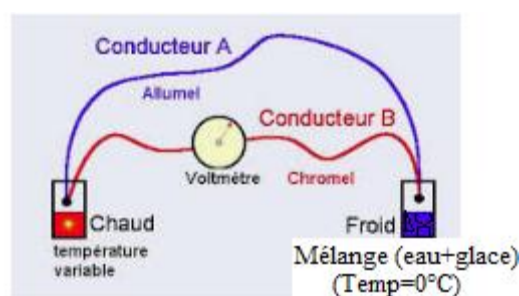


Figure II.2. Montage traditionnel des thermocouples

Le bain de glace est désormais considéré comme impraticable et est remplacé par un dispositif de compensation de la jonction de référence comme l'indique la figure II.3. Cela peut être accompli en mesurant la température de jonction de référence avec un capteur de température alternatif (par ex une RTD ou Thermistor). Ceci permet d'appliquer un facteur de correction à la tension du thermocouple avant de déduire la température.

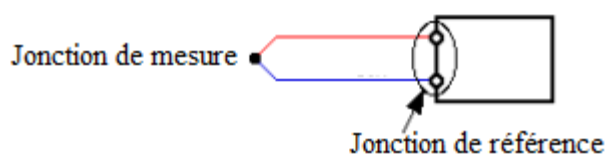


Figure II.3. Montage moderne des thermocouples

La correction peut être effectuée électriquement (hardware) ou mathématiquement par des logiciels (software). La méthode software est préférée car elle est universelle pour tous les types de thermocouples (à condition que les caractéristiques soient connues) et permet la correction des petites non-linéarités sur la plage de température de référence.

***4.** La tension de sortie des thermocouples est faible (généralement 50 mV à pleine échelle) et nécessite que l'on prenne soin d'éviter les interférences des moteurs, du câble d'alimentation, des transformateurs et de la prise de signal radio. Les torsions de la paire de fils du thermocouple (1 torsion par 10 cm) peuvent réduire considérablement la capture du champ magnétique. L'utilisation de câbles blindés ou de câbles dans un conduit métallique peut réduire la capture du champ électrique. L'appareil de mesure doit fournir un filtrage des signaux, soit matériel, soit logiciel, avec forte réjection de la fréquence de ligne (50/60 Hz) et de ses harmoniques.

***5.** L'environnement de fonctionnement du thermocouple doit être pris en compte. Exposition à l'oxydation ou à la réduction. Les atmosphères à haute température peuvent dégrader considérablement certains thermocouples. Les thermocouples contenant du rhodium (Types B, R et S) ne conviennent pas sous rayonnement neutronique.

3. Les avantages et les inconvénients des thermocouples

En raison de leurs caractéristiques physiques, les thermocouples sont la méthode préférée de mesure de la température dans de nombreuses applications. Ils peuvent être très robustes, insensibles aux chocs et aux vibrations, utiles sur une large plage de température, sont simples à fabriquer, ne nécessitent aucune puissance d'excitation, il n'y a pas d'auto-échauffement et ils peuvent être très petits. Non un autre capteur de température offre ce degré de polyvalence. Les thermocouples sont de merveilleux capteurs à expérimenter en raison de leur robustesse, de leur large plage de température et propriétés uniques. En revanche, le thermocouple produit un signal de sortie relativement faible qui n'est pas linéaire. Ces caractéristiques nécessitent un appareil de mesure sensible et stable capable de fournir une compensation de jonction de référence et une linéarisation. De plus, le faible niveau de signal exige qu'un niveau de soin plus élevé soit pris lors de l'installation pour minimiser le bruit potentiel des sources. Le matériel de mesure nécessite une bonne capacité de réjection du bruit. Les boucles de terre peuvent être un problème avec les non isolés systèmes, sauf si la plage de modes communs et le rejet sont adéquats

4. Différents types de thermocouples

Il y a huit (8) thermocouples qui ont reçu une dénomination par une lettre reconnue internationalement pour désigner les différents types des thermocouples.

Certains des thermocouples non reconnus peuvent exceller dans des applications de niche particulières et ont acquis un certain degré d'acceptation pour cette raison, ainsi qu'en raison d'une commercialisation efficace par le fabricant d'alliages. Certains d'entre eux ont reçu des désignations de type par des lettres données par leurs fabricants et ont été partiellement acceptées par l'industrie.

Chaque type de thermocouple a des caractéristiques qui peuvent être adaptées aux applications. L'industrie préfère généralement les types K et N en raison de leur aptitude à des températures élevées, tandis que d'autres préfèrent souvent le type T en raison de sa sensibilité, son faible coût et sa facilité d'utilisation.

5. Caractéristiques de quelques thermocouples

A titre d'exemples les caractéristiques des thermocouples J, K, S, et T sont résumées dans le premier tableau dans lequel les signes (+) et (-) indiquent les polarités des fils du thermocouple. Le deuxième tableau renferme les correspondances entre les fem et les températures du thermocouple de type K (entre 290°C et 720 °C). Des tableaux plus complets peuvent être dans les sites réservés aux thermocouples.

Type	Métal A (+)	Métal B (-)	Plages utilisation	Coef. Seebeck $\alpha(\mu V/^{\circ}C)$	Erreur standard
J	Fer	Constantan	-40 à +750°C	50,38 $\mu V/^{\circ}C$ à 0°C	2,2% à 0,75%
K	Chromel	Alumel	-40 à +1200°C	39,45 $\mu V/^{\circ}C$ à 0°C	2,2% à 0,75%
S	Platine 10% Rhodium	Platine	0 à +1600°C	10,21 $\mu V/^{\circ}C$ à 600°C	1,5% à 0,25%
T	Cuivre	Constantan	-40 à +350°C	38,75 $\mu V/^{\circ}C$ à 0°C	1% à 0,75%

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

6. Précision des thermocouples

Les thermocouples fonctionneront sur une large plage de températures allant du zéro absolu à leur point de fusion. Cependant ils ne sont normalement caractérisés que sur leur plage stable. La précision du thermocouple est un sujet difficile qui fait intervenir plusieurs facteurs. En principe et dans la pratique, un thermocouple peut obtenir d'excellents résultats en particulier lorsqu'il est calibré.

Les échelles des températures et de tensions ont été redéfinies en 1990. Les huit thermocouples principaux de types B, E, J, K, N, R, S et T ont été requalifiés en 1993 pour refléter les changements d'échelle. Les types restants: C, D, G, L, M, P et U semblent avoir été caractérisés de manière informelle.

7. Qualité des thermocouples

Il y a différentes qualités de fil pour la fabrication des thermocouples. Les principales différences se situent entre les qualités de files des thermocouples (qualité des files de mesure) et les qualités des files d'extension. La qualité des files de mesure possède une grande pureté et doit être utilisée là où le gradient de température est significatif. La qualité des files utilisés pour les thermocouples destinés aux mesure standards qui sont les plus couramment utilisés sont désignés par : (classe 2). La qualité des thermocouples utilisés pour les mesures spéciales (classe 1) sont disponibles avec une précision environ deux fois supérieure à ceux des mesures standards.

8. Applications des thermocouples.

Les thermocouples sont indispensables pour le fonctionnement des fours (domestiques, laboratoires et industrie) et des équipements de réfrigération.

De plus ils forment les composants essentiels pour le fonctionnement des équipements d'analyse thermique qui sont indispensables pour la caractérisation des matériaux. Parmi ces équipements on a : l'ATG, l'ATD et la DSC

ATG : Analyse thermogravimétrique, en anglais TGA : Thermogravimetric Analysis

ATD:Analyse thermique différentielle, en anglais DTA: Differential Thermal Analysis

DSC: Analyse enthalpique différentielle, en anglais Differential Scanning Calorimetry.

Une autre application appelée thermopile est aussi très importante. De la thermopile dérivent plusieurs autres applications dans les domaines de l'énergie, de la santé et des transports (avions et véhicules).