

# Tutorial : Mesurer des températures par thermocouples

Travis Ferguson

## INTRODUCTION

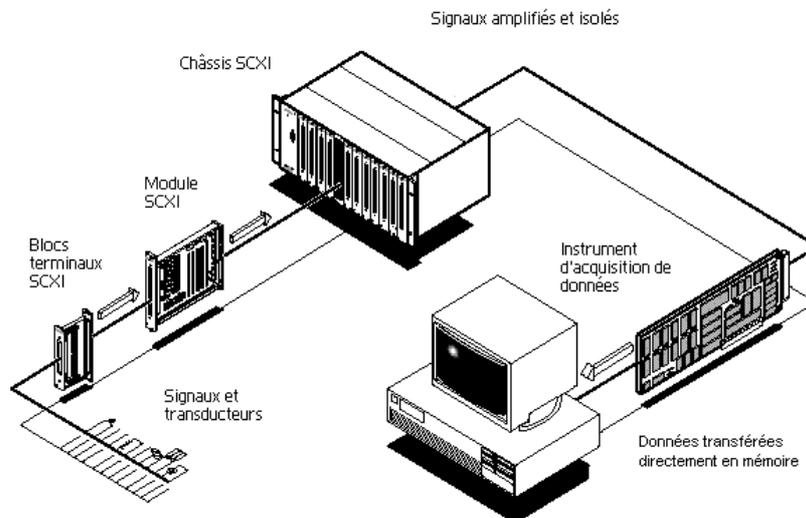
L'un des transducteurs de température les plus fréquemment utilisés est le *thermocouple*. Les thermocouples sont particulièrement durcis et économiques et peuvent opérer sur une large gamme de températures. Un thermocouple est créé dès lors que deux métaux différents entrent en contact, ce qui produit une faible tension en circuit ouvert au point de contact, qui varie en fonction de la température. Cette tension thermo-électrique est connue sous le nom de *tension de Seebeck*, d'après Thomas Seebeck qui l'a découverte en 1821. La tension n'est pas linéaire en fonction de la température. Cependant, pour de petites variations de température, la tension est approximativement linéaire, soit :

$$\Delta V \approx S \Delta T \quad (1)$$

où  $\Delta V$  est la variation de la tension,  $S$  est le coefficient de Seebeck et  $\Delta T$  la variation de la température.

Cependant,  $S$  varie en fonction de la température, ce qui rend les tensions des thermocouples non linéaires sur leurs gammes de fonctionnement. Plusieurs types de thermocouples sont disponibles ; ils sont désignés par une lettre majuscule qui indique leur composition selon les conventions de l'American National Standards Institute (ANSI). Par exemple, un thermocouple de type J est constitué d'un fil conducteur en fer et d'un autre en constantan (un alliage de cuivre et de nickel).

Vous pouvez mesurer des thermocouples en continu avec des systèmes d'acquisition de données polyvalents sur PC. Les thermocouples nécessitent un conditionnement de signaux particulier, décrit dans cette note. Le système SCXI (Signal Conditioning eXtensions for Instrumentation), illustré à la figure 1, est un frontal analogique de conditionnement de signaux pour instruments de mesure. Les systèmes SCXI sont idéaux pour l'amplification, le filtrage et même l'isolation des tensions de très bas niveau générées par le thermocouple.



**Figure 1.** Système frontal SCXI de conditionnement de signaux pour instruments DAQ enfichables

LabVIEW™, Measurement Studio™, NI-DAQ™, ni.com™ et National Instruments™ sont des marques de National Instruments Corporation. Les noms de produits et de sociétés cités sont des marques déposées par leurs propriétaires respectifs.

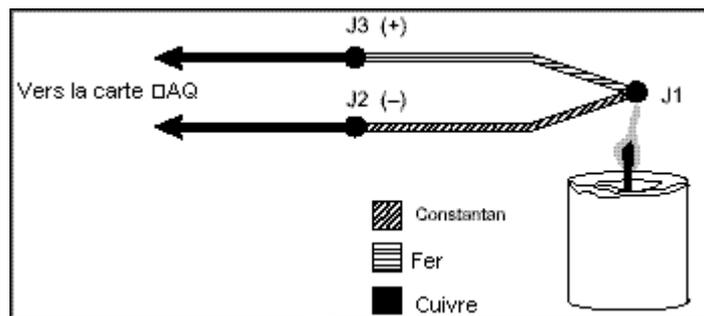


Figure 2. Thermocouple de type J

## Circuits de thermocouples

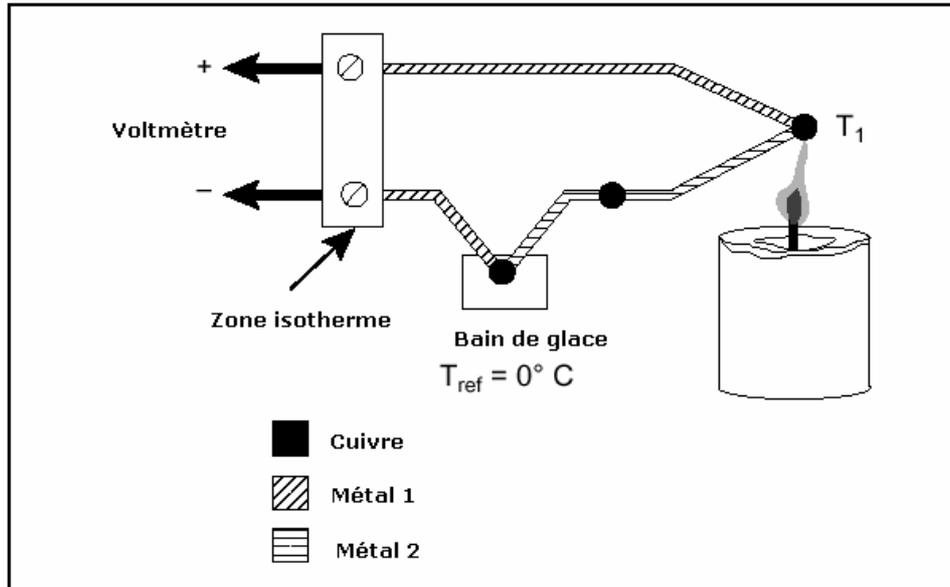
### Cas général

Afin de mesurer la tension de Seebeck d'un thermocouple, vous ne pouvez pas simplement le connecter à un voltmètre ou à un autre système de mesure, parce que le fait de connecter les fils du thermocouple au système de mesure crée des circuits thermo-électriques supplémentaires.

Examinez le circuit illustré à la figure 2, dans lequel un thermocouple de type J est situé dans la flamme d'une bougie à une certaine température que vous souhaitez mesurer. Les deux fils du thermocouple sont connectés aux fils de connexion en cuivre d'une carte DAQ (acquisition de données). Remarquez que le circuit contient trois jonctions métalliques différentes : J1, J2 et J3. J1, la soudure du thermocouple, génère une tension de Seebeck proportionnelle à la température de la flamme de la bougie. J2 et J3 possèdent chacune leur propre coefficient de Seebeck et génèrent leur propre tension thermo-électrique proportionnelle à la température, au niveau des terminaux DAQ. Afin de déterminer la contribution en tension de J1, vous devez connaître les températures des jonctions J2 et J3, ainsi que leurs relations tension/température. Vous pouvez ensuite soustraire les contributions des thermocouples parasites en J2 et J3 de la tension mesurée.

### Compensation de soudure froide

Les thermocouples nécessitent une certaine forme de référence de température pour compenser ces thermocouples parasites indésirés. Le terme *soudure froide* provient de la pratique traditionnelle de maintenir cette jonction de référence à 0° C dans un bain de glace. Les tables de référence de thermocouples de The National Institute of Standards and Technology (NIST) ont été établies avec ces paramètres, illustrés à la figure 3.



**Figure 3.** Mesure traditionnelle de température avec jonction de référence maintenue à 0° C

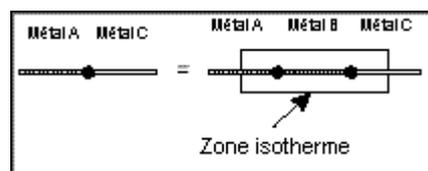
Dans la figure 3, la tension mesurée dépend de la différence entre les températures  $T_1$  et  $T_{ref}$  ; dans ce cas,  $T_{ref}$  est égale à 0° C. Comme les fils de connexion au voltmètre sont à la même température, ou *isothermes* (ce terme est décrit en détails plus bas dans cette note), les tensions générées en ces deux points sont égales et opposées. Donc, l'erreur de tension nette ajoutée par ces connexions est égale à zéro.

Dans ces conditions, lorsque la température à mesurer est supérieure à 0° C, un thermocouple présente une sortie positive ; lorsqu'elle est inférieure à 0° C, la sortie est négative. Lorsque la jonction de référence et la jonction à mesurer sont à la même température, la tension nette est égale à zéro.

Bien qu'une référence par bain de glace soit précise, elle n'est pas toujours pratique. Une approche plus pratique est de mesurer la température de la jonction de référence par un capteur de température à lecture directe, puis de soustraire les contributions de tension thermo-électrique du thermocouple parasite. Ce processus est dénommé *compensation de soudure froide*. Vous pouvez simplifier le calcul de la compensation de soudure froide en tenant compte de certaines caractéristiques des thermocouples.

En utilisant la loi des thermocouples de métaux intermédiaires et en posant quelques hypothèses simples, vous pouvez observer, à la figure 2, que la tension des mesures des cartes DAQ ne dépend que du type de thermocouple, de la tension du thermocouple et de la température de soudure froide. La tension mesurée est en réalité indépendante de la composition des fils de mesure et des soudures froides, J2 et J3.

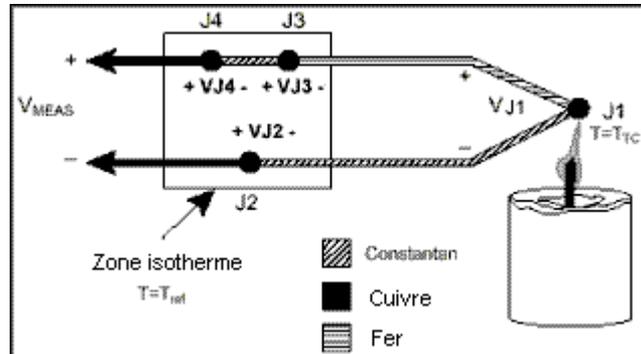
Selon la loi des thermocouples de métaux intermédiaires, illustrée à la figure 4, l'insertion de n'importe quel type de fil dans un circuit de thermocouple n'a pas d'effet sur la sortie, tant que les deux extrémités de ce fil sont à la même température, ou isothermes.



**Figure 4.** Loi des thermocouples de métaux intermédiaires

Examinez le circuit de la figure 5. Ce circuit est similaire au circuit précédemment décrit à la figure 2, mais une courte longueur de fil en constantan a été insérée juste avant la jonction J3 et les jonctions sont supposées être maintenues à des températures identiques. En prenant comme hypothèse que les jonctions J3 et J4 sont à la même température, la loi des thermocouples de métaux intermédiaires indique que le circuit de la figure 5 est électriquement équivalent au circuit de la figure 2. Donc, n'importe quel résultat relevé à partir du circuit de la figure 5 s'applique également au circuit de la figure 2.

À la figure 5, les jonctions J2 et J4 sont de même type (cuivre - constantan) ; parce qu'elles sont situées dans la zone isotherme, J2 et J4 sont aussi à la même température. Cependant, les jonctions sont disposées en sens inverse, si bien que leur contribution totale à la tension mesurée est égale à zéro. Les jonctions J1 et J3 sont des jonctions fer - constantan et sont également disposées en sens inverse, mais elles peuvent être à différentes températures. Donc, les jonctions J1 et J3 sont les deux seules jonctions qui ont un effet sur la tension totale mesurée.



**Figure 5.** Insertion d'un fil de connexion supplémentaire dans la zone isotherme

À l'aide de la notation  $V_{Jx}(T_y)$  pour indiquer la tension générée par la jonction  $J_x$  à la température  $T_y$ , le problème général du thermocouple est réduit à l'équation suivante :

$$V_{MEAS} = V_{J1}(T_{TC}) + V_{J3}(T_{ref}) \quad (2)$$

où  $V_{MEAS}$  est la tension mesurée par la carte DAQ,  $T_{TC}$  est la température du thermocouple en J1 et  $T_{ref}$  est la température de la jonction de référence.

Remarquez qu'à l'équation (2),  $V_{Jx}(T_y)$  est une tension générée à la température  $T_y$ , par rapport à une certaine référence de température. Tant que  $V_{J1}$  et  $V_{J3}$  sont des fonctions de la température relatives à la même température de référence, l'équation (2) est valide. Comme indiqué ci-dessus, par exemple, les tables de référence pour thermocouples NIST sont établies pour une jonction de référence maintenue à  $0^\circ \text{C}$ .

Parce que la jonction J3 est de même type que J1, mais en sens inverse,  $V_{J3}(T_{ref}) = -V_{J1}(T_{ref})$ . Parce que  $V_{J1}$  est la tension générée par le type de thermocouple soumis au test, cette tension peut être renommée  $V_{TC}$ . Donc, la formule (2) est réécrite de la manière suivante :

$$V_{MEAS} = V_{TC}(T_{ref}) - V_{TC}(T_{ref}) \quad (3)$$

Donc, en mesurant  $V_{MEAS}$  et  $T_{ref}$  et en connaissant la relation tension/température du thermocouple, vous pouvez déterminer la température du thermocouple.

Il existe deux techniques de mise-en-œuvre de la compensation de soudure froide : la compensation matérielle et la compensation logicielle. Ces deux techniques nécessitent la mesure de la température de la jonction de référence par un capteur à lecture directe. Un capteur à lecture directe possède une sortie qui ne dépend que de la température du point de mesure.

Des capteurs, de type semiconducteurs, des thermistances ou des RTD sont couramment utilisés pour mesurer la température de la jonction de référence. Par exemple, plusieurs blocs terminaux SCXI incluent des thermistances qui sont situées à proximité des borniers à vis de connexion des fils du thermocouple.

## Compensation matérielle

Avec la compensation matérielle, une source de tension variable est insérée dans le circuit pour annuler les tensions thermo-électriques parasites. La source de tension variable génère une tension de compensation suivant la température ambiante, et ajoute ainsi la tension correcte pour annuler les signaux thermo-électriques indésirables. Lorsque que ces signaux parasites sont annulés, le seul signal mesuré par le système DAQ est la tension provenant de la jonction du thermocouple. Avec une compensation matérielle, la température des terminaux des systèmes DAQ n'est pas significative, parce que les tensions des thermocouples parasites ont été annulées. Le principal inconvénient de la compensation matérielle est que chaque type de thermocouple doit posséder un circuit de compensation séparé, pour ajouter la tension de compensation correcte, ce qui rend le circuit relativement cher. En général, une compensation matérielle est généralement moins précise qu'une compensation logicielle.

## Compensation logicielle

La deuxième méthode consiste à utiliser un logiciel pour la compensation de soudure froide. Après la mesure de la température de la jonction de référence par un capteur à lecture directe, le logiciel peut ajouter la valeur de tension appropriée à la tension mesurée pour éliminer les effets du thermocouple parasite. Rappelez-vous la formule (3), qui indique que la tension mesurée,  $V_{MEAS}$ , est égale à la différence entre les tensions du thermocouple, à la température du thermocouple et à la température de la jonction de référence.

**Remarque** : le driver logiciel NI-DAQ, ainsi que les environnements de développement LabVIEW et Measurement Studio de National Instruments, incluent des routines intégrées qui effectuent la compensation logicielle requise.

Il existe deux manières de déterminer la température du thermocouple pour une tension mesurée donnée,  $V_{MEAS}$ , et la température à la jonction de référence,  $T_{ref}$ . La première méthode est plus précise, tandis que la seconde nécessite moins d'étapes de calcul.

### Procédure 1 : méthode d'ajout de tension directe pour la compensation de soudure froide logicielle

La méthode de compensation la plus précise utilise deux étapes de conversion tension/température. À partir de la formule (3), vous pouvez définir la véritable tension de circuit ouvert que le thermocouple produirait avec une jonction de référence à 0 °C, comme indiqué par l'équation suivante :

$$V_{TC}(T_{TC}) = V_{MEAS} + V_{TC}(T_{ref}) \quad (4)$$

Donc, cette méthode nécessite les étapes suivantes :

1. Mesure de la température de la jonction de référence,  $T_{ref}$ .
2. Conversion de cette température en une *tension* équivalente pour le type de thermocouple soumis au test,  $V_{TC}(T_{ref})$ . Pour cela, vous pouvez utiliser, soit les tables de référence NIST, soit des polynômes qui supposent une jonction de référence à 0° C.
3. Ajout de cette tension équivalente à la tension mesurée,  $V_{MEAS}$ , pour obtenir la véritable tension de circuit ouvert que le thermocouple produirait avec une jonction de référence à 0° C,  $V_{TC}(T_{TC})$ .
4. Conversion de la tension résultante en température ; cette valeur est la température du thermocouple,  $T_{TC}$ .

Cette méthode de compensation nécessite une traduction de la température de la jonction en tension du thermocouple, suivie d'une traduction de la nouvelle tension en température. Chacune de ces étapes de

traduction nécessite, soit un calcul polynômial, soit une table de référence. Elle est, cependant, plus précise que la méthode suivante.

## Procédure 2 : méthode d'ajout de température pour la compensation de soudure froide logicielle

Une seconde approche de compensation logicielle, plus facile, utilise le fait que les tensions de sortie du thermocouple sont approximativement linéaires pour de faibles variations de température. Donc, pour de faibles variations de température, vous pouvez utiliser l'équation suivante :

$$V_{TC}(T_1) - V_{TC}(T_2) \approx V_{TC}(T_1 - T_2) \quad (5)$$

Cette hypothèse est vraie si  $T_1$  est relativement proche de  $T_2$ , parce que la courbe de tension du thermocouple en fonction de la température est approximativement linéaire pour de petites variations de la température. En supposant que la température du thermocouple soit relativement proche de la température de référence, vous pouvez ré-écrire la formule (3) de la façon suivante :

$$V_{MEAS} = V_{TC}(T_{TC} - T_{ref}) \quad (6)$$

Rappelez-vous que si vous utilisez des tables de référence de thermocouples étalons NIST ou des équations, la tension  $V_{TC}$  est une fonction de la température, relative à la température de référence de  $0^\circ\text{C}$ . En supposant une linéarité et en utilisant l'équation (6), on suppose que les courbes de tension en fonction de la température avec une température de référence de  $0^\circ\text{C}$  sont identiques aux courbes avec une température de référence de  $T_{ref}$ . Donc, vous pouvez convertir la tension mesurée en température à l'aide des tables de référence NIST. Cette température représente la différence entre les températures  $T_{TC}$  et  $T_{ref}$ . Cette méthode de compensation simplifiée est la suivante :

1. Mesure de la température de la jonction de référence,  $T_{ref}$ .
2. Conversion de la tension mesurée,  $V_{MEAS}$ , en température à l'aide de la relation tension/température du thermocouple. Cette température est approximativement égale à la différence entre les températures du thermocouple et de la référence de soudure froide,  $T_{TC} - T_{ref}$ .
3. Ajout de la température de la jonction de référence,  $T_{ref}$ , à cette valeur. Il s'agit de la température du thermocouple.

Cette méthode économise une étape de calcul par rapport à la première méthode de compensation logicielle, mais elle est moins précise.

Une comparaison de la précision de ces deux méthodes est incluse dans les exemples d'application plus bas dans cette note.

## Linéarisation des données

Les tensions de sortie d'un thermocouple sont fortement non linéaires. Le coefficient de Seebeck peut varier d'un facteur de trois ou davantage sur la gamme de températures de fonctionnement de certains thermocouples. Pour cette raison, vous devez, soit approximer la courbe de tension en fonction de la température du thermocouple à l'aide de polynômes, soit utiliser une table de référence. Les polynômes sont de la forme suivante :

$$T = a_0 + a_1v + a_2v^2 + \dots + a_nv^n \quad (7)$$

où  $v$  est la tension du thermocouple en *volts*,  $T$  est la température en degrés Celsius et  $a_0$  à  $a_n$  sont des coefficients spécifiques à chaque type de thermocouple. Le tableau 1 indique la liste des coefficients polynomiaux NIST pour plusieurs types de thermocouple sur une gamme de température déterminée.

**Tableau 1.** Coefficients des polynômes NIST pour conversion tension/température  
( $T = a_0 + a_1v + a_2v^2 + \dots + a_nv^n$ )

	Type de thermocouple					
	E	J	K	R	S	T
<b>Plage</b>	<b>0 à 1000° C</b>	<b>0 à 760° C</b>	<b>0 à 500° C</b>	<b>-50 à 250° C</b>	<b>-50 à 250° C</b>	<b>0 à 400° C</b>
$a_0$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$a_1$	1,7057035E-2	1,978425E-2	2,508355E-2	1,8891380E-1	1,84949460E-1	2,592800E-2
$a_2$	-2,3301759E-7	-2,001204E-7	7,860106E-8	-9,3835290E-5	-8,00504062E-5	-7,602961E-7
$a_3$	6,5435585E-12	1,036969E-11	-2,503131E-10	1,3068619E-7	1,02237430E-7	4,637791E-11
$a_4$	-7,3562749E-17	-2,549687E-16	8,315270E-14	-2,2703580E-10	-1,52248592E-10	-2,165394E-15
$a_5$	-1,7896001E-21	3,585153E-21	-1,228034E-17	3,5145659E-13	1,88821343E-13	6,048144E-20
$a_6$	8,4036165E-26	-5,344285E-26	9,804036E-22	-3,8953900E-16	-1,59085941E-16	-7,293422E-25
$a_7$	-1,3735879E-30	5,099890E-31	-4,413030E-26	2,8239471E-19	8,23027880E-20	
$a_8$	1,0629823E-35		1,057734E-30	-1,2607281E-22	-2,34181944E-23	
$a_9$	-3,2447087E-41		-1,052755E-35	3,1353611E-26	2,79786260E-27	
$a_{10}$				-3,3187769E-30		
<b>Erreur</b>	<b>±0,02° C</b>	<b>±0,05° C</b>	<b>±0,05° C</b>	<b>±0,02° C</b>	<b>±0,02° C</b>	<b>±0,03° C</b>

Les erreurs indiquées dans la liste du tableau 1 ne s'appliquent qu'au calcul polynomial et ne prennent pas en compte les erreurs introduites par le système de mesure ou par le thermocouple lui-même.

Rappelez-vous que la procédure 1, pour la compensation logicielle de soudure froide, nécessite également une étape de conversion température/tension, pour transformer la température de soudure froide en tension équivalente pour un type particulier de thermocouple. Pour cela, vous pouvez, soit utiliser les tables de référence pour thermocouples, soit approximer la courbe par un polynôme. Le NIST spécifie également un jeu de polynômes pour la tension du thermocouple en fonction de la température,

$$v = c_0 + c_1T + c_2T^2 + \dots + c_nT^n \quad (8)$$

où  $c_0$  à  $c_n$  sont des coefficients spécifiques à chaque type de thermocouple. Le tableau 2 indique la liste des polynômes NIST pour la conversion température/tension, pour plusieurs types de thermocouples répandus.

Le NIST spécifie également des jeux de polynômes qui couvrent des gammes de températures autres que celles listées aux tableaux 1 et 2. D'autres exemples de polynômes, y compris pour des gammes de température plus larges, sont listées dans le document « National Bureau of Standards Monograph 175 » (voir le paragraphe *Références*).

Pour accélérer le temps de calcul, un polynôme peut être traité sous forme imbriquée. Considérez le polynôme de quatrième ordre :

$$T = a_0 + a_1v + a_2v^2 + \dots + a_nv^n \quad (9)$$

Si ce polynôme est évalué tel qu'il est écrit, plusieurs multiplications inutiles seront effectuées pour élever  $v$  aux différentes puissances. Si, à la place, le polynôme est écrit et évalué comme indiqué dans la formule suivante, aucune puissance n'est calculée et le calcul est exécuté bien plus rapidement :

$$T = a_0 + v(a_1 + v(a_2 + v(a_3 + va_4))) \quad (10)$$

Ces polynômes NIST sont implémentés dans des fonctions incluses dans les logiciels LabVIEW, LabWindows/CVI, et NI-DAQ de National Instruments.

**Remarque :** à titre de précaution, vérifiez les unités indiquées pour les tensions. Dans les formules des tables 1 et 2, les tensions sont indiquées en *microvolts*. Pour certaines autres tables de thermocouples et polynômes de linéarisation, les tensions peuvent être indiquées en *millivolts* ou en *volts*. L'utilisation d'unités incorrectes produit des résultats erronés.

**Tableau 2.** Coefficients des polynômes NIST pour conversion température/tension  
( $v = c_0 + c_1T + c_2T^2 + \dots + c_nT^n$ )

Plage	Type de thermocouple					
	E	J	K	R	S	T
	0 à 1000° C	210 à 760° C	0 à 1372° C	-50 à 1064° C	-50 à 1064° C	0 à 400° C
$c_0$	0,0	0,0	-17,600413686	0,0	0,0	0,0
$c_1$	58,665508710	50,38118782	38,921204975	5,28961729765	5,40313308631	38,748106364
$c_2$	4,503227558E-2	3,047583693E-2	1,85587700E-2	1,3916658978E-2	1,2593428974E-2	3,32922279E-2
$c_3$	2,890840721E-5	8,56810657E-5	-9,9457593E-5	-2,388556930E-5	-2,324779687E-5	2,06182434E-4
$c_4$	-3,30568967E-7	1,322819530E-7	3,18409457E-7	3,5691600106E-8	3,2202882304E-8	-2,18822568E-6
$c_5$	6,50244033E-10	-1,7052958E-10	-5,607284E-10	-4,62347666E-11	-3,314651964-11	1,09968809E-8
$c_6$	-1,9197496E-13	2,09480907E-13	5,6075059E-13	5,007774410E-14	2,557442518E-14	-3,0815759E-11
$c_7$	-1,2536600E-15	-1,2538395E-16	-3,202072E-16	-3,73105886E-17	4,54791353E-14	4,54791353E-14
$c_8$	2,14892176E-18	1,56317257E-20	9,7151147E-20	1,577164824E-20	2,714431761E-21	-2,7512902E-17
$c_9$	-1,4388042E-21		-1,210472E-23	-2,81038625E-24		
$c_{10}$	3,59608995E-25		<b>REMARQUE A</b>			

**REMARQUE A :** Pour le type K, l'équation est  $v = c_0 + c_1T + c_2T^2 + \dots + c_9T^9 + 118,5976e^{(-1,183432E-4)(T - 126,9686)^2}$

## Technologies essentielles pour la mesure par thermocouples

Les paragraphes suivants décrivent les paramètres importants pour la mesure de températures par thermocouples.

### Système faible bruit

Les signaux bas niveau des thermocouples sont particulièrement sensibles au bruit. C'est pourquoi, il est vraiment important que vos matériels de mesure soient blindés et soient à faible bruit. Les matériels de mesure de National Instruments sont conçus pour empêcher les perturbations des signaux par le bruit externe. Par exemple, le système de conditionnement de signaux SCXI consiste en un châssis et des modules entièrement blindés. Les signaux sont transmis par un bus analogique à faible bruit vers un matériel d'acquisition de données enfichable via un câble blindé en paire torsadée, afin que le bruit soit le plus faible possible.



**Figure 6.** Conditionnement de signaux SCXI

Vous pouvez également améliorer significativement les performances de bruit de votre système en amplifiant les tensions bas niveau provenant d'un thermocouple, aussi près que possible de celui-ci. Avant son amplification, cette tension bas niveau est sensible au bruit du milieu ambiant. Souvent, le niveau de bruit est supérieur ou égal au signal du thermocouple lui-même. Pour aggraver le problème, les fils du thermocouple agissent comme une antenne captant ce bruit.

Cependant, une fois le signal du thermocouple amplifié, votre signal est typiquement supérieur de plusieurs ordres de grandeur au bruit de la source, réduisant ainsi ou éliminant les effets du bruit sur votre mesure.

## Amplification

Parce que les tensions de sortie des thermocouples sont très faibles, vous devez utiliser le gain le plus élevé possible, afin d'améliorer la résolution et les performances de bruit. L'amplification et la gamme d'entrée de votre convertisseur analogique/numérique (CAN) déterminent la gamme d'entrée utilisable de votre système. Il faut donc choisir soigneusement votre amplification de façon à ce que le signal du thermocouple ne sorte pas de cette gamme aux températures élevées.

Le tableau 3 présente la liste des gammes de tension de plusieurs types de thermocouples normalisés ; vous pouvez utiliser ce tableau comme guide pour déterminer les meilleurs paramètres de gamme d'entrée à utiliser.

**Tableau 3.** Tensions de sortie extrêmes de thermocouple (mV)

Type de thermocouple	Conducteur		Gamme de température (° C)	Gamme de tension (mV)	Coefficient de Seebeck (µV/° C)
	Positif	Négatif			
<b>E</b>	chromel	constantan	-270 à 1000	-9,835 à 76,358	58,70 à 0° C
<b>J</b>	fer	constantan	-210 à 1 200	-8,096 à 69,536	50,37 à 0° C
<b>K</b>	chromel	alumel	-270 à 1 372	-6,548 à 54,874	39,48 à 0° C
<b>T</b>	cuivre	constantan	-270 à 400	-6,258 à 20,869	38,74 à 0° C
<b>S</b>	platine rhodié à 10 %	platine	-50 à 1 768	-0,236 à 18,698	10,19 à 600° C
<b>R</b>	platine rhodié à 13 %	platine	-50 à 1 768	-0,226 à 21,108	11,35 à 600° C

## Filtrage d'entrée

Pour réduire encore le bruit, on peut utiliser un système de mesure muni d'un filtre passe-bas de type résistance/capacité (RC) sur chaque voie d'entrée, typiquement de 1 à 4 Hz. Ils sont utiles pour éliminer le bruit des lignes électriques à 50/60 Hz, prévalant dans la plupart des installations de laboratoires et d'usines. Pour des applications de balayage haute vitesse, vous pouvez privilégier une solution qui applique un filtre par voie, plutôt qu'une architecture qui multiplexe de nombreuses voies dans un seul filtre. Les architectures qui multiplexent de nombreuses voies par un seul filtre peuvent diminuer la vitesse de balayage globale de votre système.

## Détection de thermocouple ouvert

Il est utile de détecter la rupture, ou l'ouverture, d'un circuit de thermocouple. Sinon, vous pourriez ne pas être averti que les données en cours d'acquisition sont incorrectes, en raison de la rupture d'un thermocouple. De nombreux systèmes de mesure utilisent des technologies qui provoquent une saturation de la voie d'entrée à sa valeur de pleine échelle, positive ou négative, lorsque les fils d'entrée sont en circuit ouvert. Votre système de mesure rapportera ensuite une valeur de sortie à pleine échelle positive ou négative. Vous pouvez alors vérifier cet état par logiciel et effectuer l'action nécessaire.

## Compensation de soudure froide

Comme on l'a déjà vu, les mesures par thermocouple nécessitent une détection de la température de soudure froide (ou de référence) à l'endroit où le fil du thermocouple est connecté au système de mesure. Par conséquent, les accessoires de connexion de signaux doivent inclure un capteur précis pour la température de soudure froide et doivent être conçus pour minimiser les écarts de température entre le capteur de soudure froide et les connexions des fils du thermocouple.

Suivant le système de mesure choisi, vous disposez typiquement de plusieurs options lors du choix de la technologie de compensation de soudure froide. Certains systèmes utilisent le capteur de température LM-35CAZ de National Semiconductor en tant que référence. Ces produits génèrent une sortie sous forme de tension linéaire de 10 mV/°C. D'autres options offrent une thermistance haute précision pour mesurer la température de soudure froide. Ces mêmes produits proposent typiquement un plateau isotherme qui favorise le maintien de tous les borniers à vis et de la thermistance à la même température. Avec ces solutions, vous pouvez mesurer la température de référence avec une précision de 0,5°C.

## Balayage

Les systèmes de thermocouple sont en général des applications à bande passante étroite, parce que la température est typiquement un phénomène qui varie lentement. Cependant, vous pouvez parfois avoir besoin d'un système de mesure haute vitesse, en fonction de la taille de votre système et des entrées de capteurs autres que des thermocouples. Par exemple, si on surveille 300 thermocouples à 10 Hz, le système ne peut échantillonner chaque thermocouple qu'une fois toutes les 30 s. Un système SCXI, qui peut balayer des voies d'entrée jusqu'à la vitesse de 3 µs par voie, peut échantillonner l'ensemble des 300 thermocouples toutes les 0,9 ms. Une autre raison pour utiliser une vitesse de balayage élevée est de simuler un échantillonnage simultané. Même si vous ne voulez lire qu'une voie toutes les 10 s, vous pouvez avoir besoin de minimiser les délais d'échantillonnage entre chaque voie. Enfin, vous pouvez considérer des systèmes de balayage haute vitesse, lorsque les thermocouples ne sont pas les seuls types de signaux que vous souhaitez mesurer. La mesure de températures en même temps que d'autres signaux hautes fréquences, tels que des vibrations, peut nécessiter de mesurer toutes les voies à la même vitesse.

## Mesures différentielles

Lorsque vous utilisez des thermocouples avec une référence de masse, la mesure différentielle est importante. Avec les mesures différentielles, chaque voie utilise deux fils de signaux ; seule la différence de tension entre les fils est mesurée. L'amplificateur différentiel rejette le bruit de boucle de masse et le bruit de mode commun, qui ainsi, ne perturbent pas la mesure. D'un autre côté, avec des mesures en mode commun, les fils négatifs de tous les signaux d'entrée sont connectés à une masse commune. La mesure en mode commun permet d'augmenter le nombre de voies de votre système de mesure, mais elle peut également augmenter la probabilité de boucles de masse, et vous ne bénéficiez pas des capacités des mesures différentielles de réjection du mode commun.

## Isolation

Bien que le signal provenant d'un thermocouple soit très faible, le thermocouple lui-même peut être exposé à des tensions importantes de mode commun. Par exemple, si vous connectez un thermocouple aux bobinages d'un moteur, le signal en mode commun de votre instrument de mesure peut être de plusieurs centaines de volts. Les systèmes de mesure munis d'une isolation sont construits pour bloquer ces tensions de mode commun, ainsi que pour protéger le système contre les pics de tension ou contre des connexions de signaux incorrectes.

## Différentes options de mesure par thermocouples

National Instruments propose un large éventail d'options de mesure qui offrent de bonnes performances, une intégration étroite avec d'autres matériels et logiciels de mesure et des outils de développement améliorés, à des coûts inférieurs à ceux des systèmes traditionnels.

### SCXI

Le SCXI est un système frontal de conditionnement et de commutation de signaux pour différents matériels de mesure, que ce soient des instruments d'acquisition de données enfichables ou des multimètres numériques. Un système SCXI consiste en un châssis durci qui accueille des modules de conditionnement de signaux blindés, qui amplifient, filtrent, isolent et multiplexent des signaux analogiques provenant de thermocouples et d'autres transducteurs. Le SCXI est conçu pour des systèmes de mesure de taille importante ou pour des systèmes nécessitant une acquisition haute vitesse.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

- une architecture modulaire pour choisir votre technologie de mesure
- la possibilité d'étendre votre système à 3 072 voies
- la combinaison d'entrée analogique, sortie analogique, E/S numériques et commutation dans une unique plate-forme unifiée
- une large bande passante pour acquérir des signaux à une vitesse jusqu'à 333 kHz
- une connectivité pour choisir parmi des modules SCXI munis de connecteurs ou de blocs terminaux pour thermocouple

Pour des informations complètes à propos de la gamme de produits SCXI, visitez [ni.com/SCXI](http://ni.com/SCXI)

### SCC

Le SCC est un système frontal de conditionnement de signaux pour les instruments d'acquisition de données enfichables de la série E. Un système SCC consiste en un boîtier blindé qui accueille jusqu'à 20 modules SCC simple ou double voie pour le conditionnement des thermocouples et d'autres transducteurs. Le SCC est conçu pour des systèmes de mesure de petite taille, lorsque vous n'avez besoin que de quelques voies pour chaque type de signal ou pour des applications portables. Les systèmes SCC offrent également les options de connectivité de signaux les plus complètes et les plus souples.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

- une architecture modulaire pour choisir votre technologie de mesure voie par voie
- un système à petit nombre de voies pour conditionner jusqu'à 16 entrées analogiques et huit lignes d'E/S numériques
- un système extra-plat/portable qui s'intègre parfaitement avec d'autres technologies de mesure par ordinateur portable
- une large bande passante pour acquérir des signaux à des vitesses jusqu'à 1,25 MHz
- une connectivité pour incorporer la technologie de mini-panneaux pour offrir une connectivité personnalisée aux thermocouples et aux connecteurs BNC, LEMO® (série B) et MIL-Spec

Pour des informations complètes à propos de la gamme de produits SCC, visitez [ni.com/SCXI](http://ni.com/SCXI)

## FieldPoint

FieldPoint est un système distribué de mesures pour le suivi en continu et le contrôle des signaux pour des applications industrielles légères. Un système FieldPoint inclut un module réseau série ou Ethernet et jusqu'à neuf modules d'E/S. Chaque module d'E/S peut mesurer huit ou 16 voies. FieldPoint est conçu pour des applications de mesure de points d'E/S à différents emplacements. FieldPoint est également une solution attractive pour des applications dont on doit contrôler les coûts pour effectuer un suivi en continu faible vitesse.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

- une architecture modulaire pour choisir votre technologie de mesure sur une base par module
- la possibilité d'étendre votre système en mettant de nombreux ensembles en réseau dans un seul système
- la combinaison d'entrée analogique, sortie analogique, E/S numériques et commutation dans une unique plate-forme unifiée
- le suivi en continu faible vitesse : jusqu'à 100 Hz
- gamme de températures de 70° C, enfichable à chaud, états de démarrage programmables, chiens de garde.

Pour des informations complètes à propos de la gamme de produits FieldPoint, visitez [ni.com/fieldpoint](http://ni.com/fieldpoint)

## Enregistreurs de précision NI 4350

La série NI 4350 est constituée de numériseurs de précision spécifiquement conçus pour des mesures de température, de résistance et des mesures analogiques basses fréquences. Un système NI 4350 consiste en un instrument enfichable, un câble et des accessoires de connexion de signaux. Choisissez un instrument de la série NI 4350 comme élément de votre solution lorsque vous avez besoin de mesures haute précision à basse vitesse d'acquisition (jusqu'à 60 Hz).

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

- un système haute précision : CAN 24 bits avec filtrage numérique pour rejeter le bruit à 50/60 Hz
- une plate-forme disponible en différents formats : PCI, PXI/CompactPCI, USB, PCMCIA et ISA
- un système à petit nombre de voies avec des mesures jusqu'à 14 thermocouples par instrument
- le suivi en continu faible vitesse : vitesse de balayage maximale de 60 Hz

Pour des informations complètes sur la gamme de produits de la série NI 4350, veuillez visiter [ni.com/modularinstruments](http://ni.com/modularinstruments)

## Sources d'erreurs

En effectuant des mesures par thermocouple, les possibles sources d'erreurs comprennent la compensation, la linéarisation, la mesure, les fils du thermocouple et les erreurs expérimentales.

Les erreurs de compensation de soudure froide proviennent de deux sources : l'imprécision du capteur de température et les différences de température entre le capteur et les borniers à vis. Les capteurs à compensation de soudure froide sous forme de circuit intégré ont une précision efficace de  $\pm 0,9^\circ\text{C}$ . De plus, les variations de température entre le capteur et les borniers à vis peuvent atteindre  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , pour une précision totale de  $\pm 1,4^\circ\text{C}$ . D'autres solutions utilisent une conception isotherme pour limiter les variations de température et une thermistance haute précision pour atteindre une précision élevée de  $\pm 0,65^\circ\text{C}$ .

Les erreurs de linéarisation se produisent parce que les polynômes sont des approximations de la véritable sortie du thermocouple. L'erreur de linéarisation dépend du degré du polynôme utilisé. Le tableau 1 établit la liste des erreurs de linéarisation pour les polynômes NIST.

L'erreur de mesure est le résultat des imprécisions du numériseur et des technologies de conditionnement de signaux de votre dispositif de mesure. Ces erreurs incluent l'erreur d'offset, l'erreur de gain, les non linéarités et la résolution du CAN. Bien que les produits de National Instruments soient étalonnés pour minimiser les erreurs d'offset, vous pouvez entièrement éliminer l'erreur d'offset de n'importe quel produit en mettant l'entrée à la masse, en prenant une lecture et en soustrayant cette erreur d'offset des lectures suivantes. Certains produits offrent automatiquement cette fonctionnalité.

Les amplificateurs de votre système peuvent également introduire une erreur du gain. Par exemple, une erreur de gain du système de 0,03 % peut résulter en une erreur de 6 mV, suivant les paramètres de gain. Cependant, vous pouvez utiliser une source d'étalonnage externe pour éliminer complètement cette source d'erreur.

D'autres sources d'erreurs de mesure incluent la non linéarité et la résolution du numériseur. Ces erreurs sont typiquement minimisées en utilisant un gain élevé dans les matériels de mesure par thermocouples.

Souvent, la source d'erreurs majeure est le thermocouple lui-même. L'erreur de fil du thermocouple, par exemple, est provoquée par une hétérogénéité dans le procédé de fabrication du thermocouple. Ces erreurs varient largement suivant le type de thermocouple et même la jauge de fil utilisé, mais une valeur de  $\pm 2^\circ\text{C}$  est typique. Vérifiez les spécifications de précision exactes avec le fabricant du thermocouple. Pour éliminer cette erreur, une pratique courante est d'acheter une bobine de fil de thermocouple et de réaliser vos propres thermocouples. Ceci assure la cohérence des mesures entre vos thermocouples. Ensuite, lorsque vous étalonnez votre système pour l'un des thermocouples, il est étalonné pour tous vos thermocouples.

Une autre source potentielle d'erreurs est le bruit capté par les fils de connexion du thermocouple. Le filtrage passe bas est la méthode d'élimination du bruit la plus efficace, mais un moyennage logiciel peut également éliminer le bruit de vos mesures.

## Conclusion

Les thermocouples sont des capteurs de température peu onéreux, largement utilisés avec les systèmes de mesure sur PC.

La mesure par thermocouples nécessite des technologies de conditionnement de signaux spécifiques, telles que la compensation de soudure froide, l'amplification et la linéarisation. Il faut également prendre en compte d'autres technologies de conditionnement de signaux, telles que le filtrage passe bas, l'isolation et la conception isotherme, lorsqu'elles sont appropriées. National Instruments offre plusieurs solutions de mesure par thermocouples, comme le matériel de conditionnement de signaux SCXI et SCC, les modules FieldPoint pour les applications distribuées et les enregistreurs de données pour les mesures de précision.

## Références

G. W. Burns, M. G. Scroger, G. F. Strouse, et al. *Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the IPTS-90* NIST Monograph 175. Washington, D.C. : U.S. Department of Commerce, 1993.



340524D-01

Feb01