

Comment étalonner un thermocouple

Note d'application

Série de notes d'application relatives aux thermocouples

Il s'agit de la quatrième de quatre notes d'application relatives aux thermocouples

1. L'essentiel des thermocouples
2. Guide de sélection d'équipement d'étalonnage de thermocouple
3. Calcul d'incertitude lié au système d'étalonnage de thermocouple
4. Comment étalonner un thermocouple

Configuration d'étalonnage de thermocouple

Connexion de l'afficheur

La connexion du thermocouple à l'afficheur dépend du type de raccord de référence utilisé (interne ou externe). Les raccords de référence internes sont généralement utilisés avec les applications à haut débit requérant un niveau de précision faible ou moyen. Les possibilités d'erreur sont moindres et le processus est plus simple. Les limites en matière de précision sont dues à l'incertitude additionnelle provenant du circuit de compensation du raccord de référence (généralement 0,05 à 0,25 °C supplémentaire).

Connexion de raccord de référence interne

Connectez les deux fils du thermocouple directement ou via une rallonge à l'afficheur, tout en tenant compte de la polarité. N'utilisez jamais des rallonges en cuivre, car ce matériau est source d'erreurs. Assurez-vous que toutes les connexions sont propres et bien serrées. Les connexions desserrées ou sales sont la cause de tensions parasites et d'erreurs de mesure. L'utilisation de commutateurs et de multiplexeurs sont également la cause d'erreurs, car ces appareils sont généralement conçus en cuivre. Il existe des commutateurs conçus avec les mêmes matériaux que ceux du thermocouple et qui peuvent être utilisés pour étalonner un grand nombre de thermocouples de même type. Cependant, les commutateurs conçus avec les mêmes matériaux que ceux du thermocouple constituent tout de même une source d'erreur extrêmement difficile à quantifier. Si un grand nombre de thermocouples doit être étalonné, un afficheur multicanal ou l'emploi d'une technique de raccord de référence externe doit être employée.

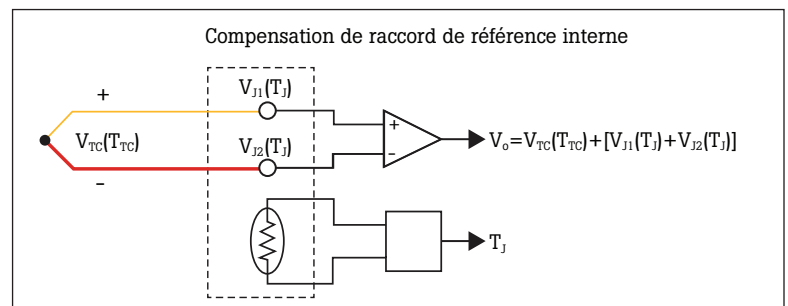


Figure 1. Connexion de raccord de référence interne.

Connexion de raccord de référence externe

Les raccords de référence externes offrent un maximum de précision et sont presque systématiquement utilisés pour étalonner les thermocouples à base de métaux nobles (de type R et S). Ils ne sont généralement pas nécessaires pour répondre aux exigences de précision des thermocouples à base de métaux usuels. Les raccords de référence externes doivent être utilisés lorsqu'un niveau élevé de précision est requis, ou lorsque l'afficheur n'est pas équipé d'une compensation de raccord de référence interne (tel que la plupart des multimètres numériques). La connexion de raccord de référence externe n'est que légèrement plus complexe lorsqu'il n'implique qu'une unité testée, mais peut devenir très compliquée lorsqu'il s'agit d'étalonner plusieurs unités tout en maintenant le niveau d'incertitude au minimum.

Le thermocouple est connecté à l'afficheur par des fils en cuivre de haute qualité. Les connexions thermocouple-cuivre sont ensuite plongées dans un bain de glace pour former le raccord de référence. Les connexions doivent être isolées électriquement l'une de l'autre et physiquement sèches. Généralement, les fils sont soudés ou solidement entortillés, et protégés par un tube thermorétractible. Le groupe de fils est inséré dans un tube fin en métal ou en verre, ce dernier est ensuite immergé dans le bain de glace. La profondeur d'immersion est importante selon le diamètre du fil. Généralement, 15 à 30 cm sont suffisants. Les fils de connexion en cuivre sont attachés soit directement à l'afficheur, soit via un commutateur. Chaque unité testée requiert un raccord de référence individuel.

L'extrémité de certaines unités testées inclut des connecteurs de thermocouple et ne peut pas être correctement connectée comme indiqué. Dans ces cas-là, des « sondes de raccord de référence » peuvent être fabriquées à partir de fils en cuivre et de thermocouple du type requis. L'extrémité du thermocouple inclut des connecteurs compatibles avec ceux de l'unité testée. Ces sondes doivent être étalonnées si un niveau élevé de précision est requis. Autrement, une compensation de raccord de référence interne peut être utilisée. Souvent, les afficheurs équipés d'une compensation de raccord de référence interne disposent de connecteurs de thermocouple intégrés

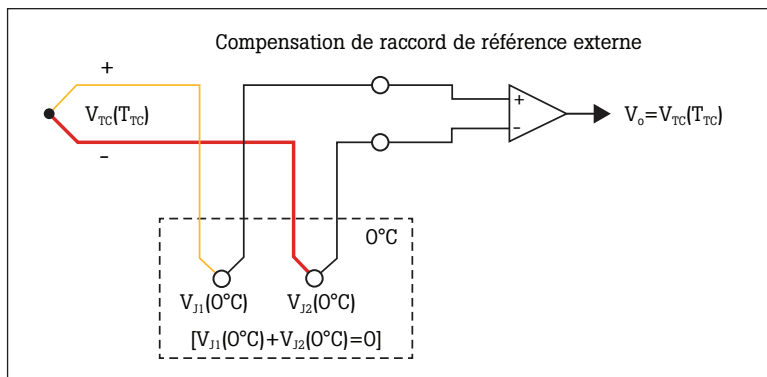


Figure 2. Connexion de raccord de référence externe.

Disposition des sondes

Toutes les sources de températures ont leur lot d'instabilités et de gradients. Cela cause des erreurs ou des incertitudes d'étalonnage. Les sondes doivent être placées ensemble, aussi proche l'une de l'autre que possible, pour minimiser ces effets. Dans les sources de température à puits sec, les points d'immersion de la sonde sont fixes. Les bains et les fours à tube ouvert offre la flexibilité nécessaire pour installer la sonde. Les sondes à étalonner doivent être placées de façon radiale, avec la sonde de référence au centre du cercle. Lorsque vous utilisez un four à tube, les thermocouples sont regroupés autour d'un thermomètre de référence, maintenus ensemble par un support en fibre de verre ou un ruban et introduits dans un four. Cette disposition permet de placer les unités testées à distance égale de la sonde de référence.

Les capteurs doivent être placés au même niveau. Les raccords de thermocouple se trouvent généralement à la pointe de la sonde. Une immersion suffisante est requise pour éviter les pertes thermiques. Généralement, la profondeur est suffisante lorsque les sondes sont immergées à une profondeur égale à 15 fois le diamètre de la sonde plus la longueur du capteur. Par exemple, pour une sonde dont le diamètre est de 6,35 mm et un capteur mesurant 31,75 mm de long, la profondeur minimale requise sera de 127 mm $((15 \times 6,35 \text{ mm}) + 31,75 = 127 \text{ mm})$. Cette règle est généralement correcte pour les sondes aux parois fines et dans un environnement favorable au transfert de chaleur. La profondeur doit être accrue si les parois de la sonde sont épaisses ou si l'environnement n'est pas propice au transfert de chaleur (tel qu'un puits sec dont la taille des orifices est inappropriée).

Collecte des données

Selon les normes et directives de l'industrie, la plage de température de fonctionnement d'un thermocouple doit être étalonnée dans sa totalité. L'étalonnage peut prendre beaucoup de temps, particulièrement s'il s'applique à plusieurs thermocouples. Ce processus implique d'amener la source thermique à une température de consigne et d'enregistrer les mesures du thermocouple lorsque la température de consigne est stable. Pour chaque température de consigne, patientez jusqu'à ce que la source thermique soit suffisamment stable et uniforme pour prendre les mesures. Répétez le processus pour chaque température de consigne de sorte à couvrir la plage de température de fonctionnement du thermocouple.

Étalonnage automatique de thermocouple avec le 1586A Super-DAQ

Le 1586A Super-DAQ inclut une fonction d'étalonnage automatisé de capteur qui permet d'automatiser le processus d'étalonnage des thermocouples. Lorsque le 1586A Super-DAQ est connecté au four d'étalonnage de thermocouple 9118A, il est en mesure de contrôler et de surveiller les points de consigne du four, d'enregistrer 40 thermocouples et de recueillir automatiquement les données lorsque la température du four correspond aux paramètres définis par l'utilisateur. Le dispositif Super-DAQ guidera ensuite le four 9118A vers les points de consigne programmés, tout en recueillant les données correspondantes. Une fois le test configuré et lancé, le technicien peut s'en aller et se livrer à d'autres activités. Cette fonction unique, exclusif à Fluke Calibration, améliore notablement la productivité des laboratoires et la précision des mesures.

Pour plus d'informations, rendez-vous sur le centre de ressources du 1586A : www.flukecal.com.

Deux options d'étalonnage

Il existe deux types d'étalonnage de thermocouple : caractérisation et test de tolérance. La plupart des thermocouples ne sont pas suffisamment stables pour la caractérisation. Généralement, les sondes ou les fils de thermocouple subissent des tests de tolérance pour être conformes aux taux d'erreur de l'ASTM (American Society for Testing and Materials). Les tests de tolérance consistent à mesurer la tension de sortie de plusieurs températures et à calculer les erreurs à partir de tables standard.

Test de tolérance

Pour la plupart des applications, les thermocouples subissent des tests de tolérance pour vérifier que leur comportement soit conforme à certaines limites prévues par le modèle standard. L'ASTM propose deux ensembles de limites appelées « Limites standard d'erreur » et « Limites spéciales d'erreur ». La tolérance des limites spéciales d'erreur est plus stricte. Ces dernières ont été développées pour prendre en compte l'amélioration des performances et la meilleure qualité des fils des thermocouples haut de gamme. L'étalonnage d'un thermocouple conformément aux spécifications de l'ASTM permet de déterminer sa conformité au modèle standard. Les sondes individuelles de thermocouple sont étalonnées dans certains cas, alors que les rouleaux entiers de fils requièrent une certification dans d'autres cas. La méthode est simple et ne requiert aucun ajustement de données ni calcul complexe.

Étapes du test de tolérance

1. Les valeurs de tension et les températures des thermocouples testés sont comparées aux mesures obtenues par un thermocouple standard de référence. Les valeurs de tension peuvent être relevées directement depuis un voltmètre numérique suffisamment précis ou depuis un autre afficheur approprié.
2. La différence de température de chaque thermocouple testé par rapport au thermocouple standard de référence est notée. Cette conversion est effectuée à partir d'une table de tension par rapport aux températures correspondantes (en °C) pour le type de thermocouple. Les tables valides doivent contenir les mêmes données et valeurs que celles mentionnées dans la monographie NIST 175 (1993) ou dans l'ASTM E230-03 (2011).
3. Les tolérances de thermocouple, telles qu'illustrées en annexe A « Table résumant la tolérance de thermocouple », servent à déterminer si les thermocouples testés sont conformes aux « limites de tolérance standard ou spéciales » en fonction des mesures obtenues à partir du thermocouple de référence.

Caractérisation de thermocouples

Lorsque le test de tolérance ne fournit pas suffisamment d'informations concernant la réponse en tension du thermocouple à une température appliquée, la caractérisation des performances d'un thermocouple sur toute sa plage fournit une analyse plus complète. La caractérisation de thermocouples est généralement réservée aux applications requérant un niveau élevé de précision qui impliquent des thermocouples à base de métaux nobles. Le plus souvent, les thermocouples à base de métaux usuels ne sont pas suffisamment stables pour reproduire le comportement observé au cours de la caractérisation.

La caractérisation de thermocouples permet de déterminer la différence entre la tension mesurée et la tension standard, et de corriger cette différence en l'ajustant à un polynôme du second degré. Il est facile d'ajuster des données en théorie, mais c'est bien plus compliqué dans la pratique. Sur le fond, le processus consiste à résoudre un ensemble d'équations simultanées contenant les données d'étalonnage, afin d'aboutir à un ensemble unique de coefficients pour le thermocouple et l'étalonnage. Une « caractérisation » acceptée repose sur les principes de la publication spéciale 250-35 NIST, utilisés de façon similaire par Fluke Calibration pour la recertifications des thermocouples de type S et R⁽¹⁾,

Étapes de caractérisation

1. Les thermocouples sont disposés de façon séquentielle sur quatre cellules point fixe. Voir la figure 3 pour consulter le résumé des cellules point fixe. La tension des thermocouples testés est mesurée par rapport aux quatre températures de référence des cellules point fixe. Alors que le raccord de mesure du thermocouple se trouve dans la cellule point fixe, le raccord de référence du thermocouple est contrôlé dans un bain au point de congélation surveillé par une thermistance de référence indépendante. Remarque : Un four et un thermocouple standard de référence peuvent servir à fournir l'environnement thermique de test à la place des cellules point fixe. Dans ce cas, le four est réglé sur plusieurs températures de référence pour que les mesures des thermocouples testés en position radiale puissent être comparées aux mesures du thermocouple standard de référence placé au centre du four.

2. Une fois que les thermocouples testés et que la cellule point fixe ont atteint leur équilibre thermique, la tension du thermocouple est enregistrée. Cette étape est répétée pour chacune des températures de la cellule point fixe. La mesure de tension de chacun des thermocouples inclut un enregistrement correspondant à la température du point de congélation dans un conteneur isolé, où se trouve le raccord de référence du thermocouple.
3. Les mesures uniques de tension provenant du thermocouple testé à chaque point fixe fournissent les données nécessaires au calcul de la « fonction de déviation ». Cette fonction est ensuite ajoutée à la « fonction de référence » standard selon le type de thermocouple. En résulte finalement la « caractérisation » du thermocouple testé.

Pour formuler la « fonction de déviation », plusieurs opérations d'algèbre linéaire sont calculées pour déterminer une « solution des moindres carrés » pour le système surdéterminé formé par les « températures point fixe et leurs valeurs au carré » et « les différences de tension entre les valeurs mesurées par le thermocouple testé aux températures point fixe » et les valeurs de tension de la « fonction de référence » correspondante, pour les mêmes températures point fixe. La solution des moindres carrés fournit deux coefficients qui sont ajoutés algébriquement aux termes correspondants dans la « fonction de référence » pour produire la fonction de « caractérisation du thermocouple ». Voir l'annexe B pour consulter le résumé des opérations d'algèbre linéaire.

Élément ou composant	Symbole chimique	Température du point de congélation ITS-90 (°C)
Argent	Ag	961,78
Aluminium	Al	660,323
Zinc	Zn	419,527
Étain	Sn	231,928
Eau	H ₂ O	0,010

⁽²⁾Monographie NIST 175, (1993), p. 4.

Figure 3. Résumé de la cellule point fixe

Annexe A : table résumant la tolérance de thermocouple^(3, 4)

TYPE B				
Pt - 30 % Rh vs Pt - 6 % Rh			Couleur de la rallonge de l'échelle de mesure = gris	
Températures de test	Sensibilité de type B	FEM nominal	Tolérance des limites standard (\pm °C)	Tolérance des limites spéciales (\pm °C)
1250 °C	10,622 μ V/°C	7,311 mV	6,25	3,13
1000 °C	9,123 μ V/°C	4,834 mV	5	2,5

Plage : 870 à 1 700 °C ; tolérances : Standard : $\pm 0,5$ % du relevé ; Spéciale : $\pm 0,25$ % du relevé.

Type E				
Ni - Cr vs constantan			Couleur de la rallonge de l'échelle de mesure = violet	
Températures de test	Sensibilité de type E	FEM nominal	Tolérance des limites standard (\pm °C)	Tolérance des limites spéciales (\pm °C)
870 °C	77,393 μ V/°C	66,473 mV	4,35	3,48
500 °C	80,930 μ V/°C	37,005 mV	2,5	2
250 °C	76,240 μ V/°C	17,181 mV	1,7	1

Plage : -200 à 870 °C ; tolérances : Standard : $\pm 1,7$ °C ou $\pm 0,5$ % du relevé (0 à 870 °C), la plus élevée des deux.
Spéciale : ± 1 °C ou $\pm 0,4$ % du relevé (0 à 870 °C), la plus élevée des deux.

TYPE J				
Fer vs constantan			Couleur de la rallonge de l'échelle de mesure = noir	
Températures de test	Sensibilité de type J	FEM nominal	Tolérance des limites standard (\pm °C)	Tolérance des limites spéciales (\pm °C)
760 °C	63,699 μ V/°C	42,281 mV	5,63	3
500 °C	55,987 μ V/°C	27,393 mV	3,75	2
250 °C	55,512 μ V/°C	13,555 mV	2,2	1,1

Plage : 0 à 760 °C ; tolérances : Standard : $\pm 2,2$ °C ou $\pm 0,75$ % du relevé, la plus élevée des deux.
Spéciale : $\pm 1,1$ °C ou $\pm 0,40$ % du relevé, la plus élevée des deux.

TYPE K				
Ni - 10 % Cr vs Ni - 5 % (alumine - silice)			Couleur de la rallonge de l'échelle de mesure = jaune	
Températures de test	Sensibilité de type K	FEM nominal	Tolérance des limites standard (\pm °C)	Tolérance des limites spéciales (\pm °C)
1 260 °C	35,566 μ V/°C	51 mV	9,45	5,04
900 °C	40,005 μ V/°C	37,326 mV	6,75	3,6
600 °C	42,505 μ V/°C	24,905 mV	4,5	2,4
300 °C	41,446 μ V/°C	12,209 mV	2,25	1,2

Plage : -200 à 1 260 °C ; tolérances : Standard : $\pm 2,2$ °C ou $\pm 0,75$ % du relevé (0 à 1 260 °C), la plus élevée des deux.
Spéciale : $\pm 1,1$ °C ou $\pm 0,40$ % du relevé (0 à 1 260 °C), la plus élevée des deux.

TYPE N				
Ni - 14 % Cr - 1,5 % Si vs. Ni - 4,5 % Si - 0,1 % Mg		Couleur de la rallonge de l'échelle de mesure = orange		
Températures de test	Sensibilité de type N	FEM nominal	Tolérance des limites standard (\pm °C)	Tolérance des limites spéciales (\pm °C)
1 260 °C	36,580 μ V/°C	46,060 mV	9,45	5,04
900 °C	39,040 μ V/°C	32,371 mV	6,75	3,6
600 °C	38,959 μ V/°C	20,613 mV	4,5	2,4
300 °C	35,422 μ V/°C	9,341 mV	2,25	1,2
Plage : 0 à 1 260 °C ; tolérances : Standard : $\pm 2,2$ °C ou $\pm 0,75$ % du relevé, la plus élevée des deux. Spéciale : $\pm 1,1$ °C ou $\pm 0,40$ % du relevé, la plus élevée des deux.				

TYPE R				
Pt vs Pt - 13 %Rh		Couleur de la rallonge de l'échelle de mesure = vert		
Températures de test	Sensibilité de type R	FEM nominal	Tolérance des limites standard (\pm °C)	Tolérance des limites spéciales (\pm °C)
1 084,62 °C	13,575 μ V/°C	11,64 mV	2,71	1,09
961,78 °C	13,065 μ V/°C	10,003 mV	2,4	0,96
660,32 °C	11,641 μ V/°C	6,277 mV	1,65	0,66
419,53 °C	10,480 μ V/°C	3,611 mV	1,5	0,6
231,93 °C	9,168 μ V/°C	1,756 mV	1,5	0,6
Plage : 0 à 1 480 °C ; tolérances : Standard : $\pm 1,5$ °C ou $\pm 0,25$ % du relevé, la plus élevée des deux. Spéciale : $\pm 0,6$ °C ou $\pm 0,1$ % du relevé, la plus élevée des deux.				

TYPE S				
Pt vs Pt - 10 %Rh		Couleur de la rallonge de l'échelle de mesure = vert		
Températures de test	Sensibilité de type S	FEM nominal	Tolérance des limites standard (\pm °C)	Tolérance des limites spéciales (\pm °C)
1 084,62 °C	11,798 μ V/°C	10,575 mV	2,71	1,09
961,78 °C	11,418 μ V/°C	9,148 mV	2,4	0,96
660,32 °C	10,398 μ V/°C	5,86 mV	1,65	0,66
419,53 °C	9,638 μ V/°C	3,447 mV	1,5	0,6
231,93 °C	8,711 μ V/°C	1,715 mV	1,5	0,6
Plage : 0 à 1 480 °C ; tolérances : Standard : $\pm 1,5$ °C ou $\pm 0,25$ % du relevé, la plus élevée des deux. Spéciale : $\pm 0,6$ °C ou $\pm 0,1$ % du relevé, la plus élevée des deux.				

TYPE T				
Cu vs constantan		Couleur de la rallonge de l'échelle de mesure = bleu		
Températures de test	Sensibilité de type T	FEM nominal	Tolérance des limites standard (\pm °C)	Tolérance des limites spéciales (\pm °C)
370 °C	60,928 μ V/°C	19,03 mV	2,78	1,48
200 °C	53,150 μ V/°C	9,288 mV	1,5	0,8
100 °C	46,785 μ V/°C	4,279 mV	1	0,5
Plage : -200 à 370 °C ; tolérances : Standard : ± 1 °C ou $\pm 0,5$ % du relevé (0 à 370 °C), la plus élevée des deux. Spéciale : ± 1 °C ou $\pm 0,4$ % du relevé (0 à 370 °C), la plus élevée des deux.				

Annexe B : opération d'algèbre linéaire de caractérisation de thermocouple étape par étape

1. Les températures point fixe et les températures au carré correspondantes sont notées sous la forme d'une matrice 5 x 2 nommée « A ». Veuillez consulter les informations qui concluent cette annexe pour en savoir plus sur les matrices et leur contenu décrits au cours de ces étapes.
2. Une matrice plus petite de type 2 x 1, placée en tant que facteur à droite de la matrice « A », sert à spécifier le vecteur solution. Cette matrice est nommée « X ».
3. Le produit des deux matrices antérieures, « A » et « X », est égal à la matrice finale formée par les différences des valeurs FEM mesurées sur l'unité testée et les valeurs FEM de la « fonction de référence » au niveau des températures point fixe. Il s'agit d'une matrice 5 x 1 nommée « b »
4. Ce système d'équations adopte la forme suivante : $[A] [X] = [b]$ ⁽⁵⁾.
5. En utilisant les matrices d'identité transposées et inverses, une solution des moindres carrés « x* » de l'équation de l'étape 4 prend la forme suivante : $[x^*] = ([A^T] [A])^{-1} [A^T] [b]$ ⁽⁵⁾.

Les équations matricielles des étapes 4 et 5 ont été adaptées à partir de l'information de la référence (5), pages 50 à 54.

6. La matrice solution $[x^*]$ est de type 2 x 1 et contient les deux coefficients non nuls de la courbe de second degré (meilleur ajustement), « dc_1 » et « dc_2 ».
7. La « fonction de référence » du thermocouple de type S peut être développée comme suit :
 $FEM_{ref} = c_0 + (c_1) \cdot t_{90} + (c_2) \cdot t_{90}^2 + (c_3) \cdot t_{90}^3 + \dots + (c_8) \cdot t_{90}^8$ (où FEM est en μVdc , et t_{90} est en $^{\circ}C$).
8. La « fonction de déviation » ou la courbe de second degré de meilleur ajustement est $FEM_{dev} = 0 + (dc_1) \cdot t_{90} + (dc_2) \cdot t_{90}^2$
9. Finalement, si la « fonction de déviation » de l'étape 8 est ajoutée algébriquement à la « fonction de référence » de type S de l'étape 7, l'équation de superposition constitue l'unique « caractérisation du thermocouple » testé de type S.

$$FEM_{char} = c_0 + (dc_1 + c_1) \cdot t_{90} + (dc_2 + c_2) \cdot t_{90}^2 + (c_3) \cdot t_{90}^3 + \dots + (c_8) \cdot t_{90}^8$$
 ⁽⁶⁾

Les matrices de caractérisation, les éléments et la solution des moindres carrés $[x^*]$ (température en $^{\circ}C$ et FEM en mVdc)

Système d'équations matricielles : $[A] [X] = [b]$

$$\text{Éléments matriciels : } [A] = \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(0)}^2 \\ t_{(Sn)} & t_{(Sn)}^2 \\ t_{(Zn)} & t_{(Zn)}^2 \\ t_{(Al)} & t_{(Al)}^2 \\ t_{(Ag)} & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \quad [X] = \begin{bmatrix} dc_1 \\ dc_2 \end{bmatrix} \quad [b] = \begin{bmatrix} mv_{mes.(0)} - mv_{ref.(0)} \\ mv_{mes.(Sn)} - mv_{ref.(Sn)} \\ mv_{mes.(Zn)} - mv_{ref.(Zn)} \\ mv_{mes.(Al)} - mv_{ref.(Al)} \\ mv_{mes.(Ag)} - mv_{ref.(Ag)} \end{bmatrix}$$

Matrices de solution des moindres carrés : $[x^*] = ([A^T] [A])^{-1} [A^T] [b]$ (où $[x^*] \approx \begin{bmatrix} dc_1 \\ dc_2 \end{bmatrix}$ et $[x^*]$ se rapproche de $[X]$)

$$\text{Éléments matriciels : } [A^T] [A] = \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(Sn)} & t_{(Zn)} & t_{(Al)} & t_{(Ag)} \\ t_{(0)}^2 & t_{(Sn)}^2 & t_{(Zn)}^2 & t_{(Al)}^2 & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(0)}^2 \\ t_{(Sn)} & t_{(Sn)}^2 \\ t_{(Zn)} & t_{(Zn)}^2 \\ t_{(Al)} & t_{(Al)}^2 \\ t_{(Ag)} & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} t_i^2 & \sum_{i=0}^{Ag} t_i^3 \\ \sum_{i=0}^{Ag} t_i^3 & \sum_{i=0}^{Ag} t_i^4 \end{bmatrix}$$

$$([A^T] [A])^{-1} = \frac{1}{\left[\left(\sum_{i=0}^{Ag} t_i^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{Ag} t_i^4 \right) \right] - \left[\left(\sum_{i=0}^{Ag} t_i^3 \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{Ag} t_i^3 \right) \right]} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} t_i^4 & -\sum_{i=0}^{Ag} t_i^3 \\ -\sum_{i=0}^{Ag} t_i^3 & \sum_{i=0}^{Ag} t_i^2 \end{bmatrix}$$

Solution des moindres carrés :

[x*]

$$[x^*] = \frac{1}{\left[\left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \right) - \left[\left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i) \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i) \right) \right] \right]} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 & -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(Sn)} & t_{(Zn)} & t_{(Al)} & t_{(Ag)} \\ t_{(0)}^2 & t_{(Sn)}^2 & t_{(Zn)}^2 & t_{(Al)}^2 & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} mv_{mes.(0)} - mv_{ref.(0)} \\ mv_{mes.(Sn)} - mv_{ref.(Sn)} \\ mv_{mes.(Zn)} - mv_{ref.(Zn)} \\ mv_{mes.(Al)} - mv_{ref.(Al)} \\ mv_{mes.(Ag)} - mv_{ref.(Ag)} \end{bmatrix}$$

Références

- 1) Publication spéciale NIST 250-35, « The Calibration of Thermocouples and Thermocouple Materials », G.W. Burns et M.G. Scroger, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1989.
- 2) Monographie NIST 175, « Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90 », G.W. Burns, et al, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1993.
- 3) ASTM E230-03, « Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (FEM) Tables for Standardized Thermocouples », ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 2003.
- 4) Référence technique d'ingénierie Omega, Section Z. <http://www.omega.com/temperature/Z/zsection.asp> (utilisé pour les codes de couleur de thermocouple)
- 5) Transformation géométrique et déformation d'image, université d'Utah, SCI (School of Computer Imaging) Institute, School of Computing, présentation MS-PowerPoint de Ross Whitaker, modifié par Guido Gerig, classe CS6640, automne, 2012, pages 50 à 54.
- 6) Rapport d'étalonnage de thermocouple de type S, dernière version, Fluke Calibration, American Fork, UT, p. 2 de 14.

Fluke Calibration. *Precision, performance, confidence.™*

Electrique	RF	Température	Pression	Débit	Logiciel
------------	----	-------------	----------	-------	----------

Fluke Calibration
 PO Box 9090,
 Everett, WA 98206, États-Unis.

Fluke Europe B.V.
 PO Box 1186, 5602 BD
 Eindhoven, Pays-Bas

Pour plus d'informations, contactez-nous :
 Depuis les États-Unis : tél. (877) 355-3225 ou fax (425) 446-5116
 Depuis l'Europe/le Moyen-Orient/l'Afrique : tél. +31 (0) 40 2675 200
 ou fax +31 (0) 40 2675 222
 Depuis le Canada : tél. (800)-36-FLUKE ou fax (905) 890-6866
 Depuis un autre pays : +1 (425) 446-5500 ou fax +1 (425) 446-5116
 Site Internet : <http://www.flukecal.com>

©2015 Fluke Calibration.
 Les caractéristiques sont susceptibles d'être modifiées sans préavis.
 Imprimé aux États-Unis 6/2015
 Pub-ID 13350-fre Rev 01

La modification de ce document n'est pas permise sans l'autorisation écrite de Fluke Corporation.