

Calcul d'incertitude lié au système d'étalonnage de thermocouple

Note d'application

Série de notes d'application relatives aux thermocouples

Il s'agit de la troisième 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



Scanner de température de précision Super-DAQ 1586A avec multiplexeur DAQ-STAQ

Budget d'incertitude d'échantillons

Plusieurs incertitudes d'étalonnage doivent être évaluées pour déterminer l'incertitude totale d'un système d'étalonnage de thermocouple. Cette section illustre comment préparer le budget d'incertitude d'un système incluant les équipements suivants lors de l'étalonnage d'un thermocouple à 1 000 °C :

- Sonde de référence : thermocouple de type S 5650 avec raccord de référence
- Afficheur : scanner de température de précision Super-DAQ 1586A avec multiplexeur DAQ-STAQ
- Source thermique : four d'étalonnage pour thermocouple 9118A
- Unité testée : thermocouple de type S sans raccord de référence

La figure 1 présente un exemple de budget d'incertitude. Elle propose une méthode pour regrouper certains des plus importants facteurs d'incertitude du système. Un code est attribué à chacune des incertitudes et est accompagné d'un commentaire. Cette analyse d'incertitude est complète, mais simplifiée pour être destinée à un public susceptible de comprendre des concepts techniques généraux. Il est donc important de consulter l'institut national de métrologie le plus proche ou votre laboratoire d'étalonnage accrédité pour obtenir davantage d'informations.

L'analyse d'incertitude suivante répertorie chaque incertitude à la fois sous sa forme standard et étendue. L'incertitude standard a été multipliée par un facteur de couverture, généralement formulé par la valeur k , pour obtenir l'incertitude étendue. Autrement, l'incertitude est divisée par un diviseur de conversion pour estimer la valeur de l'incertitude standard correspondante ($k=1$). La valeur k correspond à un intervalle de confiance.



Four d'étalonnage pour thermocouple 9118A

Figure 1. Évaluation de l'incertitude d'un système de calibration par thermocouple à 1 000 °C.

Incertitude standard de type B	Code	Incertitude standard (°C)	Facteur de couverture	Incertitude étendue (°C)
Bruit de mesure / stabilité de référence (n≥30)	A1	0,01	2	0,02
Bruit de mesure / stabilité de l'unité testée (n≥30)	A2	0,01	2	0,02
Mesure de l'étalon de contrôle	A3	0,01	2	0,02
Précision de l'afficheur 1586A (pour la sonde de référence)	B1	0,19	2	0,38
Précision du raccord de référence (pour la sonde de référence)	B2	0,01	√3	0,01
Précision de l'afficheur 1586A (pour l'unité testée – Type S)	B3	0,28	2	0,56
Précision du raccord de référence (pour l'unité testée – Type S)	B4	0,07	2	0,13
Incertitude d'étalonnage de la sonde de référence	B5	0,13	2	0,26
Limite de dérive à long terme de la sonde de référence	B6	0,06	√3	0,10
Uniformité axiale du four 9118A	B7	0,10	2	0,20
Uniformité radiale du four 9118A	B8	0,12	2	0,23
Incertitude standard totale (k=1)				0,52
Incertitude étendue totale (k=2)				1,04

Remarque : Le résultat de chaque incertitude est arrondi au centième près.

Par exemple, dans la plupart des cas, k=2 correspond à un intervalle de confiance 2-sigma ou 95 %. Plus d'informations sont disponibles dans la section « Combinaison d'incertitudes » de ce document.

A1 et A2. Bruit de mesure

Le bruit de mesure constitue l'incertitude causée par le bruit et l'instabilité des relevés de mesure. Chaque point de mesure repose sur la moyenne d'au moins 30 relevés ou échantillons. L'incertitude du bruit ou de l'instabilité des 30 relevés est calculée en divisant l'écart type des 30 échantillons par la racine carré de n (n=30). Ce calcul est souvent appelé erreur type de la moyenne.

Généralement, le bruit de mesure couvre à la fois le bruit de l'afficheur et l'instabilité de la source thermique. Les spécifications du fabricant quant à la stabilité thermique devraient être similaires, mais il est préférable d'effectuer ses propres mesures et de contrôler l'écart type réel pour s'assurer que les exigences de l'analyse d'incertitude sont respectées.

L'écart type des mesures réelles ou l'erreur type de la moyenne peut être insérée dans l'analyse d'incertitude à chaque fois qu'une mesure est relevée. Sinon, une limite de bruit de mesure peut être affectée à chaque point de mesure. Dans le cas d'une limite, les mesures sont contrôlées afin de vérifier que la stabilité (écart type) répond à la limite établie dans le cadre de l'analyse d'incertitude. Dans cet exemple, nous utiliserons une limite d'écart type.

L'équation suivante indique comment effectuer ce calcul :

$$U_{A1} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{\pm 0,05 \text{ °C}}{\sqrt{30}} = \pm 0,009 \text{ °C}$$

- U_{A1} : incertitude liée au bruit de mesure (°C)
- s : écart type de la mesure (°C)
- n : nombre d'échantillons (30 ou plus)

Conseil : Si les relevés sont en unité de tension (mV), divisez U_{A1} par la sensibilité du thermocouple pour la convertir en température (°C).

A3. Mesure de l'étalon de contrôle

La mesure d'un étalon de contrôle est un indicateur de la stabilité du processus d'étalonnage. Il est recommandé de mesurer une sonde de contrôle avec l'unité testée. Les résultats de la mesure de l'étalon de contrôle sont représentés dans un graphique de contrôle et analysés pour s'assurer qu'aucune erreur inattendue ne se produise.

L'étalon de contrôle doit être similaire à l'unité testée, afin que les variations du processus aient des effets similaires sur l'étalon de contrôle et l'unité testée. Un étalon de contrôle conçu avec des matériaux métalliques non nobles risque de ne pas garantir une répétabilité suffisante pour établir la stabilité du processus d'étalonnage sur le long terme. Il est recommandé d'utiliser un thermocouple haute qualité de type S ou R comme étalon de contrôle.

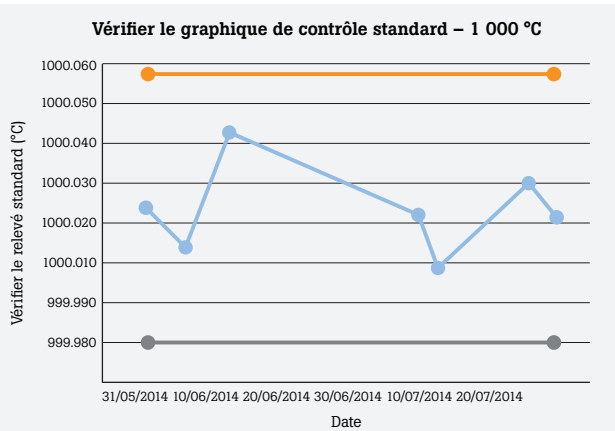
La valeur entrée dans l'analyse d'incertitude représente l'écart type des mesures de l'étalon de contrôle sur la durée. Par exemple, la table de la

figure 2 présente les relevés enregistrés lors de plusieurs sessions d'un processus d'étalonnage. L'écart type calculé à partir des sept relevés de l'étalon de contrôle est de 0,011 °C. Cette valeur peut intégrer l'analyse d'incertitude, mais il est préférable de poursuivre et d'ajouter davantage de relevés pour mettre à jour le composant de mesure d'étalon de contrôle jusqu'à ce qu'il atteigne au moins 30 relevés. Ce chiffre sert également à établir des lignes de contrôle sur le graphique de contrôle de l'étalon de contrôle. La valeur de l'écart type (σ) est multipliée par deux ou trois pour établir des lignes de contrôle 2- σ ou 3- σ , selon vos conditions d'analyse. Le graphique de contrôle d'échantillon de la figure 3 présente des lignes de contrôle 3- σ .

Figure 2 : Relevés de contrôle d'échantillons

	Relevés de l'étalon de contrôle (°C)
Session 1	1 000,025
Session 2	1 000,014
Session 3	1 000,042
Session 4	1 000,022
Session 5	1 000,008
Session 6	1 000,031
Session 7	1 000,021
	Écart type = ±0,011 °C

Figure 3 : Graphique de contrôle d'échantillons



B1 et B3. Calcul de précision de l'afficheur 1586A (pour sonde de référence et l'unité testée)

La précision de l'afficheur s'applique à la fois à la sonde de référence et à l'unité testée. Les calculs suivants montrent comment convertir

les spécifications d'un thermocouple standard en valeurs susceptibles d'intégrer l'analyse d'incertitude.

Comme la précision de la plupart des afficheurs de thermocouples est spécifiée en tension, l'équation suivante permet de convertir l'incertitude de tension en température :

$$U_{T(^{\circ}C)} = \frac{U_V}{S_{MJ}}$$

- $U_{T(^{\circ}C)}$: incertitude thermique équivalente
- U_V : incertitude de mesure de tension
- S_{MJ} : sensibilité thermique du thermocouple au niveau du raccord de mesure

Conseil : Calculez S_{MJ} avec une table de tension de thermocouple. Il s'agit de la variation de tension (mV) pour une variation de 1 °C ($\Delta V/\Delta T$).

Précision de l'afficheur 1586A pour la sonde de référence :

- La spécification de précision de tension du 1586A est de 0,004 % + 4 μV (% de relevé, $k=2$). Remarque : Ajoutez 2 μV de plus pour les unités testées dont les mesures sont effectuées à partir d'un canal de scanner DAQ-STAQ.
- Le thermocouple est de type S.
- La température est égale à 1 000 °C.
- La tension du thermocouple de type S à 1 000 °C s'élève à 9,6 mV.
- La précision de tension spécifiée pour cet intervalle est de ±0,0022 mV ($k=1$). Voir l'équation suivante :

$$U_{V(k=1)} = \frac{0,004 \times \frac{9,6 \text{ mV}}{100} + 0,004 \text{ mV}}{2} = \pm 0,0022 \text{ mV}$$

- Le thermocouple de type S a une sensibilité de ±0,0115 mV/°C à 1 000 °C.
- La précision de l'afficheur est convertie en unités thermiques comme suit :

$$U_{T(^{\circ}C)} = \frac{\pm 0,0022 \text{ mV}}{\pm 0,0115 \text{ mV}/^{\circ}C} = \pm 0,191 \text{ }^{\circ}C$$

B2. Précision du raccord de référence (pour la sonde de référence)

Le raccord de référence peut être externe ou interne. Dans cet exemple, un raccord externe est utilisé. L'incertitude du raccord de référence externe dépend du type d'équipement utilisé. La plupart des laboratoires utilisent des sources thermiques à 0 °C, telles que des bains de glace ou des puits secs, tels que le puits sec point zéro Fluke 9101. Les incertitudes liées aux bains de glace sont aussi faibles que quelques mK,

mais requièrent des techniques méticuleuses et souvent complexes. Le principal laboratoire d'étalonnage thermique de Fluke emploie une approche simplifiée en utilisant un bain de glace pilée et d'eau du robinet, tout en surveillant la température avec une sonde à thermistance et un afficheur. L'incertitude liée à cette approche est basée sur la plage thermique acceptable du bain de glace, qui est de $0\text{ °C} \pm 0,025\text{ °C}$. Pour préparer un bain de glace offrant une incertitude moins élevée, consultez le document E563-11 de l'ASTM « Standard Practice for Preparation and Use of an Ice-Point Bath as a Reference Temperature ».

L'équation suivante sert à calculer l'incertitude thermique effective du raccord de référence. Lorsque vous évaluez un thermocouple, les deux raccords contribuent à la mesure. Ainsi, l'incertitude du raccord de référence est multipliée par le rapport des valeurs de sensibilité du thermocouple (Seebeck) au niveau de la température du raccord de référence et du raccord de mesure pour calculer l'incertitude effective du raccord de référence.

$$U_{RJ_Effective} = \frac{U_{RJ} \times S_{RJ}}{S_{MJ}}$$

- $U_{RJ_Effective}$: incertitude thermique effective du raccord de référence
- U_{RJ} : incertitude du raccord de référence
- S_{MJ} : sensibilité thermique du thermocouple au niveau du raccord de mesure
- S_{RJ} : sensibilité thermique du thermocouple au niveau du raccord de référence

Calcul de l'incertitude thermique du raccord de référence de l'exemple suivant :

- Le thermocouple est de type S.
- La température est égale à $1\ 000\text{ °C}$.
- La précision du raccord de référence est de $0,025\text{ °C}$.
- Le thermocouple a une sensibilité de $0,0115\text{ mV/°C}$ à $1\ 000\text{ °C}$.
- Le thermocouple a une sensibilité de $0,006\text{ mV/°C}$ à 25 °C .
- L'incertitude thermique équivalente est égale à $0,013\text{ °C}$.

$$U_{RJ_Effective} = \frac{0,025\text{ °C} \times 0,006\text{ mV/°C}}{0,0115\text{ mV/°C}} = 0,013\text{ °C}$$

- La formule suivante convertit l'incertitude en incertitude standard :

$$U_{B2\ (k=1)} = \frac{0,013\text{ °C}}{\sqrt{3}} = 0,007\text{ °C}$$

B4. Précision du raccord de référence (pour l'unité testée)

Dans cet exemple, l'incertitude correspondante au raccord de référence interne est calculée à partir de l'équation suivante.

$$U_{RJ_Effective} = \frac{U_{RJ} \times S_{RJ}}{S_{MJ}}$$

- $U_{RJ_Effective}$: incertitude thermique effective du raccord de référence
- U_{RJ} : incertitude du raccord de référence
- S_{MJ} : sensibilité thermique du thermocouple au niveau du raccord de mesure
- S_{RJ} : sensibilité thermique du thermocouple au niveau du raccord de référence

Calcul de l'incertitude thermique du raccord de référence interne de l'exemple suivant :

- Le thermocouple est de type S.
- La température est égale à $1\ 000\text{ °C}$.
- La précision du raccord de référence interne du 1586A est de $0,25\text{ °C}$ ($k=2$) ou de $0,13\text{ °C}$ ($k=1$).
- Le thermocouple a une sensibilité de $0,0115\text{ mV/°C}$ à $1\ 000\text{ °C}$.
- Le thermocouple a une sensibilité de $0,006\text{ mV/°C}$ à 25 °C .
- L'incertitude thermique équivalente est calculée comme suit :

$$U_{RJ_Effective} = \frac{0,25\text{ °C} \times 0,006\text{ mV/°C}}{0,0115\text{ mV/°C}} = 0,13\text{ °C}$$

- La formule suivante convertit l'incertitude en incertitude standard :

$$U_{B2\ (k=1)} = \frac{0,13\text{ °C}}{2} = 0,07\text{ °C}$$

B5. Incertitude d'étalonnage de la sonde de référence

Ce niveau d'incertitude est relevé directement sur le certificat d'étalonnage de la sonde de référence. Si l'incertitude à un point de température spécifique n'est pas répertoriée sur le certificat, elle devra être calculée. Consultez le fournisseur d'étalonnage pour obtenir des conseils quant à la manière d'effectuer ce calcul. Une approximation sûre, mais souvent surestimée, est de choisir l'incertitude la plus élevée des deux points de température rapportés.

Si la sonde de référence est un thermocouple, assurez-vous de prendre en compte l'inhomogénéité. Si l'incertitude d'étalonnage ne prend pas en compte l'inhomogénéité, il

est alors important d'inclure un composant d'incertitude supplémentaire. Consultez un laboratoire d'étalonnage réputé ou l'institut national de métrologie pour obtenir plus d'informations sur ce sujet.

B6. Dérive à long terme de la sonde de référence

La dérive à long terme de la sonde de référence est difficile à déterminer. Les fabricants sont susceptibles de spécifier la dérive à long terme en utilisant une valeur basée sur un certain nombre d'heures d'utilisation à une température maximale. Cette méthode prend seulement en compte le vieillissement du matériau et ne couvre pas d'autres sources de dérive, telles que la manipulation, les chocs mécaniques et les cycles thermiques. Il est pertinent de prendre en compte la spécification du fabricant relative à la dérive à long terme, mais il est tout aussi important de surveiller la sonde afin de détecter toute dérive.

- La dérive à long terme autorisée est de $\pm 0,1$ °C (divisez par la racine carrée de 3 pour convertir à $\pm 0,06$ °C, $k=1$).

B7 et B8. Uniformité axiale et radiale du four

Les principaux facteurs qui affectent l'analyse d'incertitude et qui proviennent du four sont la stabilité et l'uniformité. La stabilité est déjà prise en compte dans les mesures de bruit A1 et A2, car l'incertitude correspondante décrit le bruit général du système d'étalonnage, y compris la stabilité du four. L'uniformité est spécifiée de deux façons : radiale (de cavité à cavité) et axiale (gradient sur plusieurs profondeurs du bloc d'équilibre). Ces valeurs sont spécifiées par le fabricant et sont répertoriées dans la figure 4. Vous pouvez vous fier de ces valeurs pour établir un budget d'incertitude préliminaire, mais il est préférable de les vérifier. Dans certains cas, l'incertitude peut être réduite, car les performances de l'unité sont meilleures que celles spécifiées par le fabricant. Pour estimer les valeurs d'uniformité à 1 000 °C, utilisez les valeurs exprimées pour 700 °C et 1 200 °C, puis interpolez de façon linéaire.

- Uniformité spécifiée par le fabricant à 1 000 °C : axiale $\pm 0,2$ °C ($k=2$) ou $\pm 0,1$ °C ($k=1$) et radiale $\pm 0,23$ °C ($k=2$) ou $\pm 0,12$ °C ($k=1$)

Figure 4 : Spécifications du fabricant du 9118A

Homogénéité radiale		
Température	9118A (14 mm (0,6 po) du point central géométrique)	9118A-ITB de cavité à cavité
300 °C	$\pm 0,5$ °C	$\pm 0,1$ °C
700 °C	$\pm 0,5$ °C	$\pm 0,20$ °C
1 200 °C	$\pm 0,5$ °C	$\pm 0,25$ °C
Homogénéité axiale		
Température	9118A (longueur axiale de ± 30 mm (1,2 po) à partir du point central géométrique)	9118A-ITB (à 60 mm (2,4 po) à immersion complète)
Plage totale	$\pm 0,25$ °C	$\pm 0,2$ °C
Stabilité de la température		
Spécifications	9118A	9118A-ITB
Stabilité	$\pm 0,2$ °C	$\pm 0,1$ °C
Durée de stabilisation	2 heures, plage totale	2 heures à 700 °C maximum, 2 heures au delà de 700 °C
Remarque : Stabilité de la température mesurée à 2 sigmas sur 30 minutes		

Combinaison d'incertitudes

Afin de combiner tous les composants d'incertitude, ils doivent être d'abord convertis en incertitudes standard. Pour ce faire, il est important de comprendre le type (la distribution) de chaque incertitude, afin d'effectuer le bon calcul de conversion. Dans cette analyse d'incertitude, le tableau comporte deux types d'incertitude : la distribution normale et la distribution rectangulaire.

Une incertitude basée sur une distribution normale tend à concentrer la plupart des résultats au centre. La distribution a donc la forme d'une cloche. Dans le cas d'une distribution rectangulaire, le résultat a la même probabilité de se situer n'importe où sur la limite. La distribution a donc la forme d'un rectangle. Le plus souvent, une distribution rectangulaire est affectée aux limites de processus, tels que la dérive autorisée à long terme. Si la distribution est inconnue, il est sage de supposer que la distribution est rectangulaire.

Pour convertir une distribution normale étendue ($k=2$ ou $k=3$) en incertitude standard ($k=1$), divisez-la simplement par la valeur de k . Pour convertir une incertitude rectangulaire en forme standard, divisez-la par la racine carrée de 3. Pour convertir d'autres types de distribution d'incertitude, consultez le GUM (Guide to the Uncertainty in Measurement, guide d'incertitude de mesures) ou d'autres sources fiables d'informations quant à la façon de calculer les incertitudes.

Enfin, pour combiner les incertitudes standard et calculer l'incertitude totale, il est important de savoir si chaque incertitude est indépendante ou liée. Une incertitude indépendante n'a rien en commun avec les autres incertitudes. Toutes les incertitudes indépendantes peuvent être combinées ou regroupées par la somme des carrés. Un exemple de somme des carrés est indiqué ci-dessous. Les incertitudes liées ont un certain type de corrélation ou de relation avec une ou plusieurs autres incertitudes. Les incertitudes liées peuvent souvent être regroupées par une simple addition, puis la somme est ajoutée par somme des carrés aux autres incertitudes. Parfois, des techniques plus sophistiquées de calcul de corrélations sont utilisées, mais ce n'est pas le cas dans cette analyse d'incertitude.

Dans cette analyse d'incertitude, les incertitudes de précision de l'afficheur 1586A sont liées, car le même instrument sert à mesurer à la fois la sonde de référence et l'unité testée. C'est pourquoi elles sont regroupées par une simple addition, puis combinées aux autres par une somme des carrés. Une fois l'incertitude standard totale calculée, elle est multipliée par le facteur de couverture souhaité, $k=2$ (95 %), pour obtenir l'incertitude étendue totale.

Somme des carrés

$$U = \sqrt{B1^2 + B2^2 + B3^2 + B4^2 + B5^2 + B6^2 \dots}$$

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 7/2015
Pub-ID 13348-fr

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