

Beamex

Calibration White Paper

www.beamex.com
info@beamex.com



Incertitude
d'étalonnage
pour les non
mathématiciens

Incertitude d'étalonnage pour les non-mathématiciens

Ce livre blanc traite des données de base de l'incertitude des mesures et de l'étalonnage. Il n'a pas été élaboré pour des mathématiciens ni pour des experts en métrologie, mais plutôt pour ceux d'entre vous qui planifient et effectuent des mesures et des étalonnages pratiques dans des applications industrielles.

L'évaluation de l'incertitude des mesures est un concept fondamental. ***Vous ne devriez jamais effectuer de mesures sans être conscient de l'incertitude associée.*** De manière générale, la prise de conscience et l'intérêt pour l'incertitude semblent s'accroître, ce qui est une bonne chose.

L'incertitude des mesures peut provenir de diverses sources, comme l'appareil de mesure de référence utilisé pour effectuer la mesure, les conditions ambiantes, l'opérateur qui effectue les mesures et de nombreux autres facteurs.

Il existe plusieurs guides, normes et sources concernant l'incertitude d'étalonnage, et la plupart de ces documents sont remplis de formules mathématiques. Cet article tentera donc de limiter les formules mathématiques au maximum.

Il s'agit d'un guide pratique destiné à permettre une compréhension générale du vaste sujet que représente l'incertitude des mesures et des étalonnages.

L'évaluation de l'incertitude des mesures est un concept fondamental. Vous ne devriez jamais effectuer de mesure sans être conscient de l'incertitude associée.

Exemple classique du « bout de ficelle »

Commençons avec un exemple pour illustrer l'incertitude des mesures en pratique ; l'exemple consiste à donner le même morceau de ficelle à trois personnes (une à la fois) et leur demander de mesurer la longueur de cette ficelle. Aucune instruction supplémentaire n'est donnée. Ils peuvent tous utiliser leurs propres outils et leurs propres méthodes pour la mesurer.

Il est plus que probable que vous obtiendrez trois résultats différents, comme par exemple:

- La première personne dit qu'elle fait environ 60 cm. Elle a utilisé une règle en plastique de 10 cm, a mesuré la ficelle une seule fois et en est arrivée à cette conclusion.
- La seconde personne dit qu'elle fait 70 cm. Elle a utilisé un mètre-ruban de trois mètres et a vérifié le résultat deux fois pour vérifier que c'était correct.
- La troisième personne dit qu'elle fait 67,5 cm, avec une incertitude de $\pm 0,5$ cm. Elle a utilisé un mètre-ruban précis et a mesuré la ficelle plusieurs fois pour obtenir une moyenne et un écart type. Elle a aussi testé la longueur d'extension de la ficelle quand celle-ci est tirée et a remarqué que ceci avait une incidence sur le résultat.

Même cet exemple simplifié montre que le résultat d'une mesure est affecté par de nombreux facteurs : les outils de mesure qui ont été utilisés, la méthode/processus suivi(e) et la façon dont la personne a effectué le travail.

Donc, la question que vous devriez vous poser est la suivante: ***Quand le travail d'étalonnage est effectué dans votre usine, lequel de ces trois exemples ressemble le plus à votre situation ?***

Quels types d'instruments de mesure sont utilisés sur votre site et quelles sont les méthodes/processus de mesure suivi(e)s ? ***Si vous mesurez quelque chose qu'une seule fois sans connaître l'incertitude associée, le résultat n'a pas une grande valeur.***

Brève leçon de terminologie

Passons rapidement en revue les termes essentiels liés à ce sujet.

Qu'est-ce donc que ***l'incertitude*** d'une mesure ? On peut tout simplement dire qu'il s'agit du « doute » de notre mesure, c'est-à-dire qu'elle nous révèle la justesse de notre mesure. Chaque mesure effectuée possède un élément de « doute », et nous devons connaître l'ampleur de ce « doute » afin de pouvoir décider si la mesure est suffisamment bonne pour ce à quoi elle est destinée.

Il est bon de se souvenir qu'une ***erreur n'est pas la même chose qu'une incertitude.*** Lorsque nous comparons nos instruments à étalonner en fonction de l'étalon de référence, l'erreur est la différence entre ces deux mesures. Mais l'erreur en soi ne signifie rien tant que nous ne connaissons pas l'incertitude de la mesure.

Je voudrais donc dire ceci:

Si vous ne connaissez pas l'incertitude de la mesure, ne prenez pas la mesure du tout !

On a trop souvent vu par exemple, que lorsqu'une personne

prend une mesure critique de température dans son processus avec une erreur maximale tolérée (EMT) de $\pm 1,0$ °C environ, et trouve une erreur maximum de 0,5 °C, elle est satisfaite, valide la « conformité » et accepte le résultat. Cependant, après avoir analysé le processus d'étalonnage, cette personne pourrait découvrir que l'incertitude totale de son processus de mesure est de $\pm 2,0$ °C. Donc, la manière dont l'étalonnage a été effectué n'était pas suffisamment adaptée pour son application.

Mais ***tant qu'elle ne connaît pas ou n'est pas intéressée par cette incertitude, elle peut dire que la vérification est conforme***, bien qu'en réalité, il s'agit d'une non-conformité.

D'une simple mesure à la connaissance de votre écart type

Alors, comment faire pour connaître toutes les incertitudes associées ?

La première pratique simple mais efficace, est d'essayer de répéter plusieurs fois une mesure/un étalonnage/une vérification au lieu de ne l'effectuer qu'une seule fois. Il est plus que probable que vous découvrirez de petites différences de mesure entre les répétitions. Mais quelle mesure est la bonne ?

Sans s'attarder trop longtemps sur les statistiques, on peut dire qu'il n'est pas suffisant d'effectuer une mesure qu'une seule fois. Si vous répétez la même mesure plusieurs fois, vous pouvez trouver la moyenne et l'écart type de la mesure et vous apprendrez jusqu'à quel point les résultats peuvent différer entre chaque répétition. Ceci signifie que vous pouvez trouver quelle est la différence normale entre les mesures.

Il est suggéré de prendre une mesure plusieurs fois, même jusqu'à dix fois, pour qu'il soit statistiquement suffisant de

calculer l'écart type. Les composantes d'incertitude que vous obtenez en calculant l'écart type sont appelées ***l'incertitude de type A***.

Vous pourriez dire : ***Quoi ???*** - Répéter la même mesure dix fois à chaque fois est tout simplement impossible en pratique !

Par chance, il n'est pas toujours nécessaire de les répéter dix fois, mais vous devriez tout de même en faire l'expérience pendant votre processus de prise de mesures en répétant occasionnellement plusieurs fois la même mesure.

Ceci vous indiquerait l'écart type de l'ensemble de ce processus de prise de mesure et vous pourriez utiliser ces connaissances à l'avenir comme composante d'incertitude liée à cette mesure, même si vous ne prenez la mesure qu'une seule fois pendant votre étalonnage normal.

Imaginez effectuer une mesure/un étalonnage/une vérification de température plusieurs fois et vous apprenez qu'il pourrait y avoir une différence de $\pm 0,2$ °C entre chaque répétition. La prochaine fois que vous effectuerez la même mesure, même si vous ne la faites qu'une seule fois, vous serez conscient de cette différence potentielle de 0,2 °C, et vous pourrez donc en tenir compte lors du jugement de conformité par rapport à l'erreur maximale tolérée.

Donc si vous effectuez de nombreux étalonnages similaires d'instruments, il suffit souvent de ne prendre la mesure qu'une seule fois et d'utiliser l'écart type expérimental typique. Bien sûr, prendre les mesures et effectuer les calculs pour trouver l'écart type typique de l'instrument particulier et du processus d'étalonnage particulier nécessite un peu de travail.

En bref, ***vous devez toujours connaître l'écart type de votre processus d'étalonnage : il fait partie de l'incertitude totale.***

Votre étalon de référence (calibrateur) et sa traçabilité

Souvent, ***l'une des plus grandes sources d'incertitude provient de l'étalon de référence*** (ou du calibrateur) que vous utilisez pour vos mesures/étalonnages/vérifications. Naturellement, avant toutes choses, ***vous devez sélectionner un étalon de référence adéquat*** pour chaque mesure. Il est également important de se souvenir qu'il n'est pas suffisant d'utiliser les spécifications de précision du fabricant pour l'étalon de référence et de continuer à les utiliser comme incertitude des étalons de référence pendant des années. Par conséquent, ***vous devez faire étalonner vos étalons de référence régulièrement*** dans un laboratoire d'étalonnage doté des ***capacités suffisantes (incertitude suffisamment réduite)*** pour étalonner l'étalon et le rendre traçable. Faites attention à l'incertitude totale de l'étalonnage que le laboratoire a documenté pour

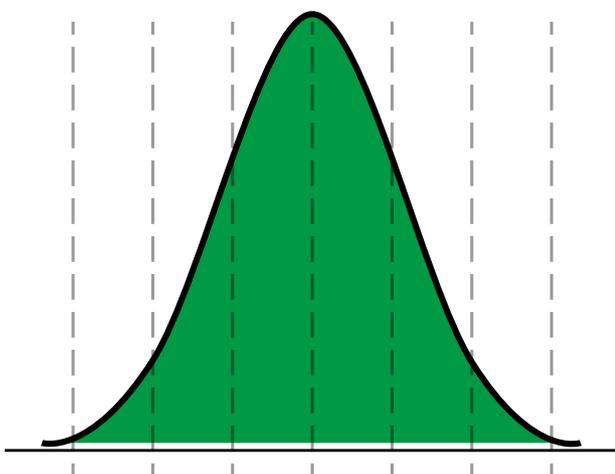
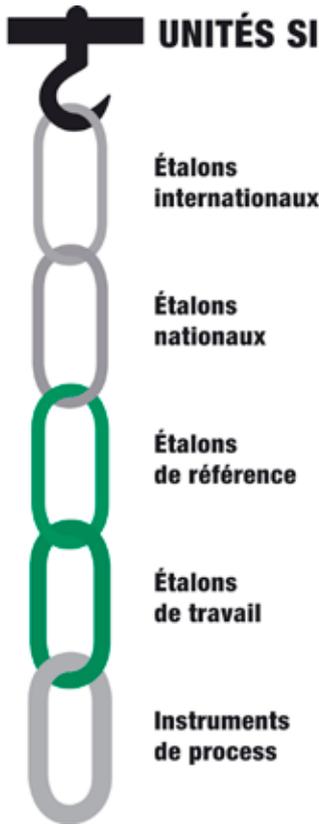


Diagramme : Écart type

votre étalon de référence. Il est également bon de **suivre la stabilité de vos étalons de référence** entre leurs étalonnages réguliers. Après un certain temps, vous apprendrez la véritable



incertitude de votre étalon de référence et vous pourrez utiliser cette information comme incertitude de votre étalon de référence dans vos étalonnages.

Autres sources d'incertitude

Dans la section précédente, je vous ai suggéré de répéter la mesure plusieurs fois. Et si vous demandiez à **plusieurs de vos collègues de répéter cette même mesure** ? Obtiendriez-vous tous exactement les mêmes résultats ? Il y a souvent des différences entre les personnes qui prennent les mesures. Est-ce que cela signifie que la personne qui prend la mesure a aussi un effet sur l'incertitude ?

- Oui, en effet et ceci est particulièrement vrai lorsque les instructions données ne sont pas appropriées.

Et que se passerait-il si vous effectuiez le même test, mais cette fois-ci vous **utiliseriez différents types d'étalons de référence (calibrateurs) pour prendre la mesure** ? Là encore, il est plus que probable que vous trouverez des différences. Et si les étalons de référence ont différents niveaux de précision (incertitude), il est même possible que vous notiez des différences relativement importantes. Souvent, l'étalon de référence (ou calibrateur) utilisé pour prendre la mesure est **une des plus grandes sources d'incertitude !**

Différentes conditions environnementales peuvent ajouter une incertitude supplémentaire à certains étalonnages. Si vous devez lire un affichage analogique (manomètre à aiguille, thermomètre), vous disposez d'une **lisibilité** limitée, c'est-à-dire que vous ne pouvez le lire que jusqu'à un certain degré de précision (mauvais angle de lecture), ce qui ajoute une l'incertitude. En cas de relevés numériques, la **résolution** (nombre de décimales) est toujours limitée, ce qui provoque

une incertitude (vous ne pouvez lire que jusqu'à la dernière décimale)

Il existe différents aspects techniques dans le processus d'étalonnage, les applications et les quantités qui créent des incertitudes supplémentaires. Par exemple lors d'un étalonnage de température, il est impératif d'attendre suffisamment longtemps que la température se stabilise et de garantir une immersion correcte de la sonde dans le four d'étalonnage; pour l'étalonnage de débit, vous devez vous assurer de la présence d'un débit stable ; pour l'étalonnage en pression, vous devez éviter les fuites et disposer d'une pression stable, etc. En général, toute fluctuation ou tout changement de la variable à mesurer provoquera des incertitudes supplémentaires.

Pour pimenter le tout, il existe aussi des **variables aléatoires**. Vous pouvez aussi utiliser **l'écart type expérimental** mentionné ci-dessus comme une des composantes d'incertitude.

Nous pouvons **résumer** brièvement ces sources d'incertitude supplémentaires comme suit:

- Dispositif testé
- Étalon de référence (calibrateur)
- Méthode/processus de prise de mesure/de réalisation des étalonnages
- Conditions environnementales
- La/les personne(s) prenant les mesures
- Composantes d'incertitude supplémentaires dépendant de la quantité mesurée/étalonnée

Toutes les composantes d'incertitude décrites ci-dessus sont appelés **l'incertitude de type B**.

Ajout des incertitudes entre elles => incertitude combinée

Le type A (écart type) peut être calculé, mais souvent, certaines des incertitudes du type B doivent être estimées. Une fois que l'écart type a été calculé et que les diverses incertitudes de type B ont été estimées, il est temps de les ajouter les unes aux autres. Avant cela, vous devez vous assurer que toutes les incertitudes sont calculées dans la même quantité/unité. De plus, les incertitudes doivent avoir le même **coefficient de couverture/ niveau de confiance**.

Quand vous ajoutez entre elles des composantes d'incertitude indépendantes les unes des autres, ne les ajoutez-pas toutes entre elles : cela produirait un résultat trop pessimiste (le pire possible). Au lieu de cela ajoutez les composantes en utilisant **la méthode des moindres carrés**. C'est-à-dire : mettez chaque composante au carré, ajoutez les toutes ensemble et enfin, calculez la racine carrée de la somme totale. Je sais que j'ai dit

que je n'utiliserai pas de formules, mais ceci est peut-être plus facile à comprendre avec cette formule relativement simple :

Incertitude totale=

$$\sqrt{u_{(1)}^2 + u_{(2)}^2 + \dots + u_{(n)}^2}$$

Où chaque « u » est une composante d'incertitude indépendante.

Facteur d'élargissement/niveau de confiance

Une fois l'incertitude déterminée, on la multiplie généralement par un *facteur d'élargissement (k)*. Le plus souvent, on multiplie l'incertitude combinée par 2 (k=2 ou 2 sigma). Cette multiplication s'effectue afin de disposer d'un plus grand *niveau de confiance* du résultat. Quand on utilise le coefficient de couverture de 2, ceci est égal à un niveau de confiance de 95 %. On fait cela parce que les données traitées sont des données statistiques et selon la *distribution normale (Gaussienne)*, 95 % des résultats se trouvent dans la plage 2 sigma. Donc en pratique, en utilisant le 2 sigma, 95 % des résultats seront dans les limites du budget d'incertitude donné. Différentes valeurs sigma donnent les niveaux de confiance suivants :

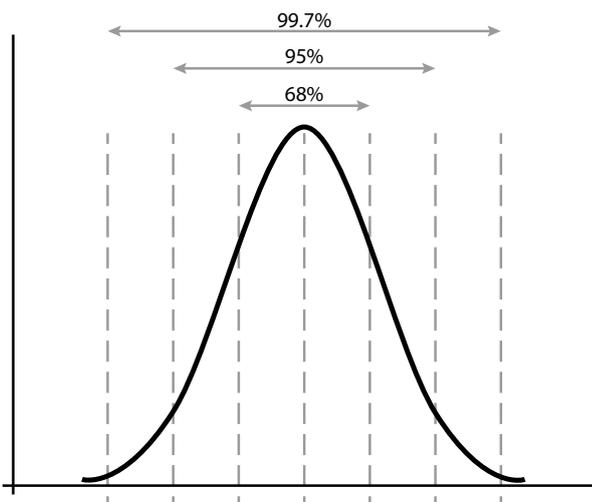


Diagramme : Écart type

- 1 sigma (k=1) = niveau de confiance de 68 % (68 % des résultats sont dans les limites)

- 2 sigma (k=2) = niveau de confiance de 95 %
- 3 sigma (k=3) = niveau de confiance de 99,7 %

Quand vous ajoutez entre elles plusieurs composantes d'incertitude, veillez à ce qu'elles aient toutes les mêmes valeurs 1 sigma avant de les ajouter.

Incertitude élargie

Avant de publier la composante d'incertitude combinée, vous devez multiplier le résultat par la valeur sigma sélectionnée afin d'obtenir le niveau de confiance requis. Une fois la multiplication effectuée, vous obtenez ce que l'on appelle *l'incertitude élargie*, c'est-à-dire l'incertitude avec un certain niveau de confiance inclus.

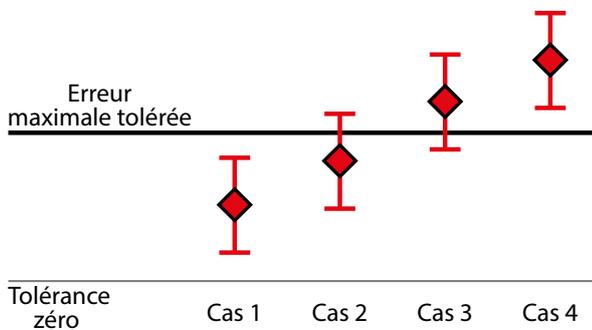
Comment exprimer l'incertitude dans un constat de vérification ou dans un certificat d'étalonnage

Dans vos résultats d'étalonnage, vous devez exprimer l'incertitude sous forme de valeur ± et aussi mentionner le facteur d'élargissement/le niveau de confiance. Par exemple, vous pouvez dire que la température est : 20,5 °C avec une incertitude de ±0,1 °C (k=2).

Déclaration de conformité : conforme ou non-conforme

Le plus souvent, l'étalonnage d'un instrument inclut un critère d'acceptation, c'est-à-dire des limites dans lesquelles le résultat est considéré comme *conforme* et en dehors desquelles il est considéré comme *non-conforme*. Il existe plusieurs interprétations selon que l'on tienne ou non compte de l'incertitude lorsque l'on décide si le résultat est conforme ou non-conforme, et de quelle manière on en tient compte.

Utilisons des exemples pour étudier différents cas. Dans l'image ci-dessous, la forme en losange illustre le résultat de la mesure et la ligne au-dessus et en dessous indique l'incertitude totale pour cette mesure.



- **Cas 1:** Ceci se trouve assez clairement dans les limites tolérées, même en tenant compte de l'incertitude. Nous pouvons donc appeler cela un bon résultat de « conformité ».
- **Cas 4:** Il s'agit là aussi d'un cas assez clair. Le résultat est en dehors des limites tolérées, même en tenant compte de l'incertitude. Nous pouvons donc appeler cela un mauvais résultat, ou une « non-conformité ».
- **Cas 2 et Cas 3:** Ces cas sont un peu plus difficiles à juger. Bien sûr, il semble que dans le cas 2, le résultat soit compris dans les limites tolérées tandis que dans le cas 3, il est en dehors, particulièrement si vous ne voulez pas tenir compte de l'incertitude. Mais si vous tenez compte de l'incertitude, vous ne pouvez pas vraiment l'affirmer avec certitude.

Il existe des réglementations (par exemple . ILAC G8:1996 - Directives sur l'évaluation et les rapports de conformité avec spécification ; Guide EURACHEM / CITAC : Usage des informations d'incertitude dans l'évaluation de la conformité, Première Édition 2007) sur la manière de déclarer la conformité de l'étalonnage. Ces guides suggèrent de déclarer un résultat comme étant conforme seulement quand l'erreur additionnée de l'incertitude est inférieure à la limite de conformité. Ils suggèrent également de ne déclarer comme non-conforme que les erreurs ajoutées (ou soustraites) de l'incertitude qui sont supérieures à la limite de conformité. Quand le résultat est plus proche de la limite de conformité que de la moitié de l'incertitude, il est suggéré de l'appeler « situation indéfinie », c'est-à-dire que vous ne devez déclarer ni conformité, ni non-conformité.

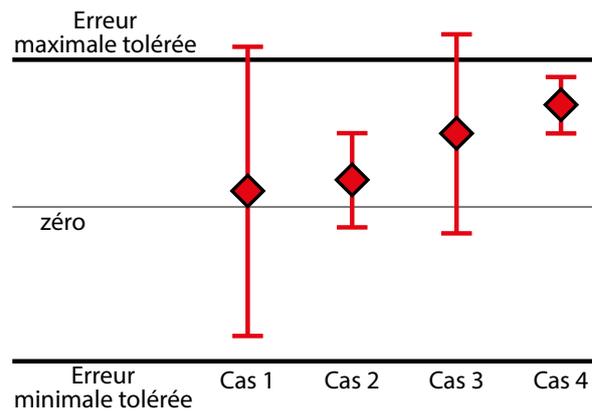
Nous avons vu de nombreuses personnes interpréter l'incertitude et les décisions de conformité/non-conformité de nombreuses façons différentes tout au long des années. En pratique, l'incertitude est plus souvent ignorée lors de la décision de conformité, mais il est de toute façon très important d'être conscient de l'incertitude, quand on prend la décision.

Exemples d'incertitude

Les graphiques ci-dessous montrent des exemples de ce que différentes incertitudes peuvent signifier en pratique.

Les cas 1 et 2 ont le même résultat de mesure, et donc sans incertitude, on pourrait considérer ces deux cas comme identiques. Mais lorsqu'on tient compte de l'incertitude, on peut voir que le cas 1 est vraiment terrible puisque l'incertitude est simplement trop importante pour être utilisée pour cette mesure avec les limites de tolérance données.

Quand on regarde les cas 3 et 4, il semble que le cas 3 soit meilleur, mais avec l'incertitude, on voit qu'il n'est pas assez bon pour une déclaration de conformité, tandis que le cas 4 l'est.



Je veux encore une fois souligner qu'il nous ***faut connaître l'incertitude avant de pouvoir juger le résultat d'une mesure.***

Sans le calcul de l'incertitude, les cas 1 et 2 ci-dessus semblent similaires, bien qu'en tenant compte de l'incertitude, ils sont très différents.

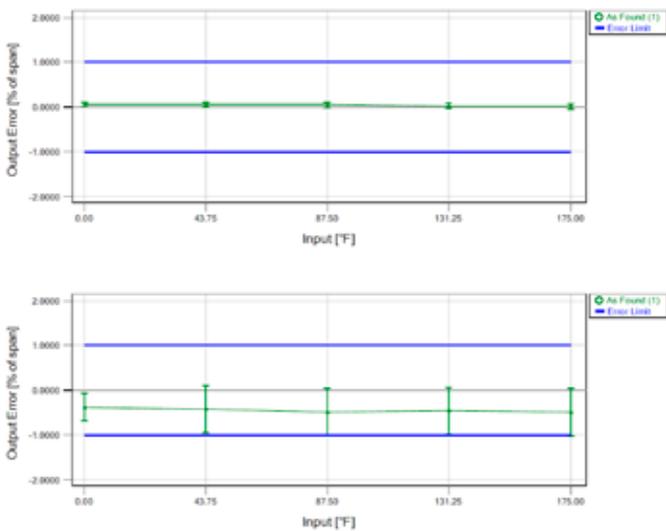
Exemple réel

Voici ci-dessous un exemple réel où le même transmetteur de température a été étalonné à l'aide de deux calibrateurs différents. Ces graphes ont été produits à l'aide du logiciel de métrologie et de gestion de parc Beamex CMX. Vous pouvez facilement voir que dans le premier cas, les résultats sont très bons et aussi la ligne verticale verte d'incertitude est très courte, ce qui indique une très faible incertitude. Dans le second cas, vous pouvez voir que le résultat est légèrement moins bon, mais l'incertitude de ce calibrateur est pire encore.

Et bien, il va sans dire que le premier cas a été relevé avec un calibrateur Beamex... ;-)

Quoi qu'il en soit, quand on voit l'incertitude sous forme

de graphique, il est très facile de remarquer sa signification.



Comparaison de la capabilité (rapport TUR/TAR) et du calcul de l’incertitude

Le *TUR (rapport d’incertitude du test)*, ou le *TAR (rapport d’exactitude du test)*, est souvent mentionné dans diverses publications. En bref, cela signifie que si vous voulez étalonner un instrument ayant une exactitude d’1 % et vous voulez obtenir un rapport de 4:1, votre étalon doit être 4 fois plus précis, c’est-à-dire avoir une exactitude de 0,25 % ou meilleure. Certaines publications suggèrent que si la capabilité est suffisamment grande, il n’y a aucun besoin de se préoccuper de l’estimation/du calcul de l’incertitude. Le rapport utilisé le plus communément est 4:1. Certains guides/publications ont aussi des recommandations pour le rapport.

La plupart du temps, la capabilité est utilisée comme dans l’exemple ci-dessus, c’est-à-dire simplement pour comparer les spécifications du dispositif testé (DUT) et les spécifications du fabricant de l’étalon de référence. ***Mais dans ce scénario, on ne tient compte que des spécifications de l’étalon de référence (équipement de test, calibrateur) et on néglige toutes les autres incertitudes associées.*** Bien que ceci soit « suffisant » pour certains, les étalonnages effectués avec ce système ne tiennent pas compte de certaines des plus grandes sources d’incertitude. Il est donc fortement recommandé d’effectuer l’évaluation/le calcul de l’incertitude de l’ensemble du processus d’étalonnage.

On nous demande aussi assez régulièrement : « Combien de fois plus précis le calibrateur doit-il être par rapport au dispositif à étalonner ? » Bien que l’on pourrait donner

certaines suggestions, il n’y a pas vraiment de réponse correcte à cette question. Au lieu de cela, il vous faut être conscient de l’incertitude totale de vos étalonnages. Et bien sûr, elle doit refléter vos besoins !

RESUME

J’espère que ce document vous a aidé à comprendre les pratiques de l’incertitude.

Pour résumer brièvement les concepts clés des principaux thèmes:

- Assurez vous de faire la distinction entre “erreur” et “incertitude”
- Essayez en faisant plusieurs répétitions de mesures pour connaitre ce qu’est un écart
- Utilisez des références appropriées (calibrateurs) et s’assurer qu’ils disposent d’une traçabilité aux standards nationaux et que l’incertitude de l’étalonnage est connue et adaptée à vos applications
- Considérez que les conditions environnementales ont un effet significatif sur l’incertitude de vos mesures
- Soyez conscient de la lisibilité et de la résolution de tout indicateur
- Étudiez les facteurs importants spécifiques des grandeurs que vous calibrez
- Familiarisez-vous avec la “Méthode des moindres carrés” pour ajouter l’ensemble des incertitudes
- Soyez conscient du facteur de couverture / du niveau de confiance / Incertitude élargie, des composantes de l’incertitude
- Plutôt, ou en plus du ratio TUR / TAR, soyez conscient de toutes les incertitudes connexes
- Faites attention à l’incertitude totale du processus d’étalonnage avant de prendre des décisions de conformité / non conformité

Si vous avez des commentaires ou des questions, et je l’espère, nous sommes à votre écoute !

Contactez-nous, www.beamex.com or marketing@beamex.com

QUELQUES OUTILS UTILES

- [EA-4/02 - Evaluation de l'incertitude de mesure dans l'étalonnage](#)
- ILAC G8:1996 - Lignes directrices sur l'évaluation et déclaration de conformité aux spécifications
- [Guide EURACHEM / CITAC: utilisez les incertitudes dans l'évaluation de la conformité, Première Edition](#)
- [ISO/IEC 17025:2005 - Exigences générales pour la compétence des laboratoires d'essais et d'étalonnage](#)
- [ISO 9001:2015 - Systèmes de gestion de la qualité - Exigences](#)
- [ISO 10012:2003 - Systèmes de gestion des mesures - Exigences pour les process de mesure et instruments de mesure](#)
- JCGM 101:2008 - Évaluation des données de mesure - Guide de l'expression de l'incertitude dans la mesure