



PROfil

Incertitudes de mesure

**Applications concrètes
pour les étalonnages - Tome 1**

**Abdérafi Charki, Denis Louvel, Éliane Renaot,
André Michel et Teodor Tiplica**



Incertitudes de mesure

Applications concrètes
pour les étalonnages - Tome 1

Abdérafi Charki, Denis Louvel,
Éliane Renaot, André Michel
et Teodor Tiplica



Légendes des illustrations de couverture (de gauche à droite) :	1. <i>Vitruvian man</i> (© HP_Photo fotolia). 2. <i>Mesures</i> . 3. <i>Le serpent de poids</i> (© SYLVIE.PERUZZI fotolia). 4. <i>Research</i> (© Enisu fotolia). 5. <i>Chimie</i> .
---	--

Imprimé en France
ISBN : 978-2-7598-0594-5

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2012

Préface

Les multiples besoins de la société moderne, basée sur la technologie, nécessitent d'effectuer toute sorte de mesures. Leurs domaines d'applications vont des expériences compliquées requises pour développer et tester les plus récentes théories scientifiques jusqu'aux utilisations quotidiennes dans l'industrie, le commerce et notre environnement immédiat. Et pourtant, à l'insu de la plupart des utilisateurs, les renseignements fournis par les mesures effectuées sont rarement complets.

En effet, tout résultat de mesure n'est en général qu'une estimation de la valeur de la quantité mesurée, la « vraie » valeur reste inconnue. Pour cette raison, on devrait évaluer la dispersion des valeurs de cette « valeur estimée » qui pourrait être attribuées au mesurande.

En terme de métrologie, la mesure de ce paramètre de dispersion est appelée l'incertitude de mesure. Lorsque l'utilisateur connaît la valeur de ce paramètre, il peut évaluer la confiance dans le résultat de la mesure effectuée. Malheureusement, il n'existe pas de moyen unique et universel d'exprimer quantitativement le « doute » que représente l'incertitude. Cette situation a conduit à l'élaboration de différentes procédures d'évaluation de l'incertitude.

Pour palier ce manque de commun accord, en 1978, le Comité International des Poids et Mesures (CIPM) a demandé à son organe exécutif, le Bureau international

des Poids et Mesures (BIPM), de formuler des principes fondamentaux de l'évaluation de l'incertitude, ce qui l'a conduit à élaborer la Recommandation INC-1 (1980).

Un document détaillant les méthodes destinées à mettre en œuvre ces principes a ensuite été élaboré. Ce document appelé GUM « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure » en anglais « Guide to the expression of Uncertainty in Measurement », est publié par l'ISO au nom du BIPM, de la CEI, de l'OIML (Organisation Internationale de la Métrologie Légale), de la Fédération Internationale de Chimie Clinique (IFCC), de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC) et l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée (UIPPA). Ce document faisant autorité est populairement connu sous le nom de GUM et ce sont les règles prescrites dans ce GUM qui sont utilisées dans le présent ouvrage.

Le présent ouvrage fait partie d'une série de deux livres. Le premier a pour but d'illustrer les méthodes pratiques permettant d'estimer les incertitudes de mesure dans les domaines du pesage, des mesures de température et des mesures dimensionnelles.

Quant au second, il présente des applications concrètes pour l'estimation des incertitudes dans les essais et les analyses.

Le problème de l'exécution d'un budget d'incertitude est en fait assez simple dans la plupart des cas. Sa solution ne représente que la formulation d'un modèle de mesure approprié, et à l'évaluation de ce modèle, conformément aux règles données dans le GUM. Néanmoins, mon expérience tant au sein d'un laboratoire national qu'auprès des laboratoires d'étalonnage accrédités ou industriels m'a montré que, lorsqu'ils sont confrontés à la tâche d'estimer les incertitudes, la plupart des praticiens pensent qu'ils entrent en territoire inexploré. C'est très probablement dû au fait que, comme son titre l'indique, le GUM n'est pas un manuel. Il s'agit d'un document plutôt laconique. Le contenu du texte est condensé et ne s'attarde pas beaucoup sur les aspects théoriques, se concentrant plutôt sur la fourniture d'un ensemble de règles qui couvrent bien la plupart des situations de mesure susceptibles d'être rencontrées dans la pratique.

Ce livre est donc une tentative pour répondre aux besoins d'un très large public. Il devrait convenir aux métrologues des laboratoires d'étalonnage et des laboratoires industriels qui souhaitent développer leurs connaissances de l'estimation des incertitudes. Il devrait également être utile aux enseignants et aux étudiants pour les cours sur la qualité, la métrologie, l'instrumentation et les sujets connexes au niveau des universités, des écoles d'ingénieurs et des instituts techniques. Il devrait aussi présenter beaucoup d'intérêt aux étudiants diplômés effectuant des recherches expérimentales dans tous les domaines de la science et la technologie. Il devrait également convenir à des scientifiques et des ingénieurs engagés dans la recherche et le développement.

Georges Bonnier
Consultant en Métrologie

Georges BONNIER est expert international en métrologie. Ex-directeur adjoint de l'Institut National de Métrologie (Désormais LNE/INM/CNAM), il est expert technique en métrologie des températures. Aujourd'hui il exerce une activité de conseiller scientifique et technique auprès du Comité Africain de Métrologie (CAFMET, <http://www.ac-metrology.com>).

This page intentionally left blank

Biographie des auteurs

Abdérafi Charki est enseignant-chercheur à l'Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers (ISTIA) (école d'ingénieurs de l'Université d'Angers). Il y enseigne la métrologie et la qualité. Sa recherche au sein du LASQUO (Laboratoire de Sécurité de fonctionnement, Qualité et Organisation) est axée sur la fiabilité de systèmes complexes. Il intervient également en tant qu'expert et évaluateur dans les laboratoires d'essais, d'analyses et d'étalonnages. Il est président du CAFMET (Comité Africain de Métrologie, <http://www.ac-metrology.com>). Il est par ailleurs éditeur en chef du journal « International Journal of Metrology and Quality Engineering » (<http://www.metrology-journal.org>).

Denis Louvel travaille pour l'entreprise Mettler-Toledo où il a plusieurs responsabilités. Il anime aussi des formations en métrologie, et accompagne les entreprises dans l'évaluation et la définition des spécifications, des équipements et logiciels.

Éliane Renaot est ingénieur au laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM, membre de la Commission générale AFNOR « Métrologie dans l'entreprise », expert technique auprès du Comité Français d'Accréditation (COFRAC).

André Michel a été responsable du centre d'étalonnage agréé en métrologie dimensionnelle du Centre Technique d'Arcueil (DGA). Il est actuellement évaluateur

technique et qualité et membre de la commission Technique d'Accréditation Mécanique et Thermique de la section Laboratoires du COFRAC.

Teodor Tiplica est enseignant-chercheur à l'Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers. Il est responsable, au sein du laboratoire LASQUO, d'une équipe de recherche axée sur l'évaluation, l'optimisation et la maîtrise des procédés.

Table des matières

Préface	iii
Biographie des auteurs	vii
Chapitre 1 • Étalonnage par comparaison de capteurs de température entre – 80 °C et 1 600 °C	1
1.1 Introduction	1
1.2 Généralités	2
1.3 Étalonnage par comparaison	3
1.4 Évaluation de l'incertitude type par une méthode de type B	6
1.5 Cas pratique : étalonnage d'une chaîne de température comportant une sonde à résistance de platine à l'aide d'une chaîne étalon également munie d'une sonde à résistance de platine	6
1.6 Étalonnage d'une chaîne de température comportant un couple thermoélectrique type K à l'aide d'une chaîne étalon intégrant un couple thermoélectrique type S	15
1.7 Étalonnage d'un thermomètre à dilatation de liquide à immersion totale à l'aide d'une chaîne étalon intégrant une sonde à résistance de platine	23
1.8 Conclusion	30
1.9 Documents de référence	30

Chapitre 2 • Estimation de l’incertitude de mesure d’un poids	33
2.1 Introduction	33
2.2 Cas pratique dans une entreprise	33
2.3 Principes clés pour l’étalonnage de poids	34
2.4 Précautions d’emploi liées aux phénomènes physiques	38
2.5 Archimède et son principe	41
2.6 La correction de poussée aérostatique	42
2.7 Détermination de la masse d’un échantillon	44
2.8 Détermination de l’incertitude de mesure	50
2.9 Incertitude de mesure d’étalonnage	51
2.10 Test de Fisher	60
2.11 Répétabilité du comparateur	63
2.12 Correction et incertitude type de la poussée de l’air	68
2.13 Document d’étalonnage	69
2.14 Préparer votre étalonnage	71
2.15 Classement des poids	73
2.16 Documents de référence	75
Chapitre 3 • Incertitude de mesure d’une balance	77
3.1 Introduction	77
3.2 Protocole appliqué	77
3.3 Principe de la méthode	78
3.4 Mesurande	78
3.5 Étape n° 1 : essais métrologiques	79
3.6 Étape n° 2 : incertitude de l’erreur d’indication $U(E_1)$	82
3.7 Étape 3 : incertitude de la balance $U(IP)$	86
3.8 Cas des balances à plusieurs étendues	94
3.9 Annexe 1 : Étape 1 – Traitement des données issues des mesures	95
3.10 Annexe 2 : Étape 2 – Incertitude de l’erreur d’indication $U(E_1)$	98
3.11 Annexe 3 : Étape 3 – Incertitude de la balance $U(IP)$	98
3.12 Documents de référence	104
Chapitre 4 • Mesures dimensionnelles par interférométrie laser	105
4.1 Introduction	105
4.2 Rappels théoriques	106
4.3 Grandeurs d’influence. Formules de Bengt Edlen	115
4.4 Exemples d’interféromètres disponibles actuellement sur le marché	118
4.5 Application à la mesure de translation	119
4.6 Autres applications disponibles	120
4.7 Raccordement des différentes grandeurs d’influence	123
4.8 Incertitudes de mesure selon la loi de propagation des incertitudes	125

4.9 Incertitudes de mesure en utilisant la méthode de GUM	131
4.10 Incertitudes de mesure en utilisant la méthode de Monte Carlo	132
4.11 Documents de référence	136

This page intentionally left blank

Étalonnage par comparaison de capteurs de température entre -80 °C et $1\ 600\text{ °C}$

1.1 Introduction

Les industriels cherchent généralement à reproduire une température plutôt qu'à connaître réellement la température thermodynamique intervenant dans leurs procédures de fabrication. Ces considérations ont conduit à mettre en place dès 1927 une échelle pratique de température reposant sur des phénomènes physiques répétables et aisément identifiables. Les mesures effectuées dans cette échelle sont néanmoins en étroite accord avec les valeurs des températures thermodynamiques. Sauf exception, on ne parlera pas de mesure de la température thermodynamique, mais de repérage de la température dans l'échelle. L'échelle actuellement en vigueur est l'échelle internationale de température de 1990 (EIT-90). Elle repose sur :

- une série de points de définition basés sur des transitions de phase de métaux purs ;
- des instruments spécifiés auxquels sont associées des formules d'interpolation ou d'extrapolation paramétrées.

La matérialisation d'une échelle de température est certes plus « pratique » que la mise en œuvre de thermomètres primaires permettant d'accéder à la température thermodynamique, néanmoins elle nécessite :

- des investissements financiers importants au niveau des équipements scientifiques nécessaires ;
- du personnel compétent qui se consacre à temps plein à cette activité.

Ce type d'étalonnage est donc réservé à des thermomètres particuliers dont les caractéristiques satisfont à des critères spécifiés dans le texte de l'échelle. Ces thermomètres, très onéreux, sont à manipuler avec beaucoup de soin et se situent au plus haut niveau de la chaîne de traçabilité. À titre d'exemple, un thermomètre étalonné entre 0 °C et 420 °C selon l'EIT-90 sera affecté d'une incertitude d'étalonnage comprise entre 0,0003 °C et 0,001 °C en fonction du niveau de température.

Pour répondre aux besoins de l'industrie, des techniques simplifiées [1.1] permettant d'approcher l'échelle internationale de température à un coût modéré, peuvent être utilisées, à condition que les incertitudes associées soient convenablement estimées.

La technique simplifiée utilisée pour l'étalonnage des capteurs de température entre – 80 °C et 1 600 °C repose sur une comparaison entre l'instrument à étalonner et un thermomètre étalon raccordé aux étalons nationaux.

Ce premier chapitre préconise des recommandations et des exemples concernant les instruments suivants :

- les sondes à résistance seules ou associées à une chaîne de mesure ;
- les couples thermoélectriques seuls ou associés à une chaîne de mesure ;
- les thermomètres à dilatation de liquide.

L'étalonnage peut concerner des capteurs seuls ou des chaînes de mesure de température. Les chaînes comprennent nécessairement un capteur (sonde à résistance, couple thermoélectrique) connecté par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs éléments à un indicateur. Ces éléments peuvent être étalonnés indépendamment mais, généralement, le niveau d'incertitude final est plus faible en faisant étalonner la chaîne dans son ensemble.

1.2 Généralités

Avant d'entreprendre un étalonnage, les considérations suivantes sont à prendre en compte :

- l'information délivrée par un capteur de température est fonction de *sa propre* température (ou de la variation de température à laquelle est soumis ce capteur). La différence, entre les températures du capteur et celle du milieu dans lequel il est placé, *peut être importante* si les conditions d'échanges thermiques n'ont pas été analysées et adaptées au mieux ;
- un capteur de température n'est pas un instrument discret. Sa présence va *modifier la répartition des températures* au sein du milieu où il est placé ;
- lorsqu'on réalise des mesures de température, il faut s'assurer avant de relever les mesures que *l'équilibre thermique* entre le capteur en étalonnage et le milieu dans

lequel il est plongé *est atteint*. Le temps nécessaire à l'obtention de l'équilibre thermique dépend :

- du temps de réponse du capteur ;
- de la nature du milieu (air, liquide...) ;
- du couplage thermique élément sensible du capteur - milieu.

1.3 Étalonnage par comparaison

L'étalonnage par comparaison consiste à comparer les indications données par un instrument de mesure aux valeurs fournies par un étalon placé dans le même milieu (figure 1.1).

Il est évident que, dans cette méthode d'étalonnage, on fait l'hypothèse que les températures des éléments sensibles de la sonde étalon et de la sonde en étalonnage sont à la même température.

Cette hypothèse ne sera jamais parfaitement satisfaite. La différence de température dépendra :

- de l'uniformité en température du milieu de comparaison ;
- de la différence de technologies entre les sondes étalon et en étalonnage (longueur de l'élément sensible, temps de réponse, nature de la gaine...).

La chaîne de mesure de température utilisée comme étalon doit être traçable (raccordée par une chaîne ininterrompue) aux étalons nationaux ou internationaux [1.2].

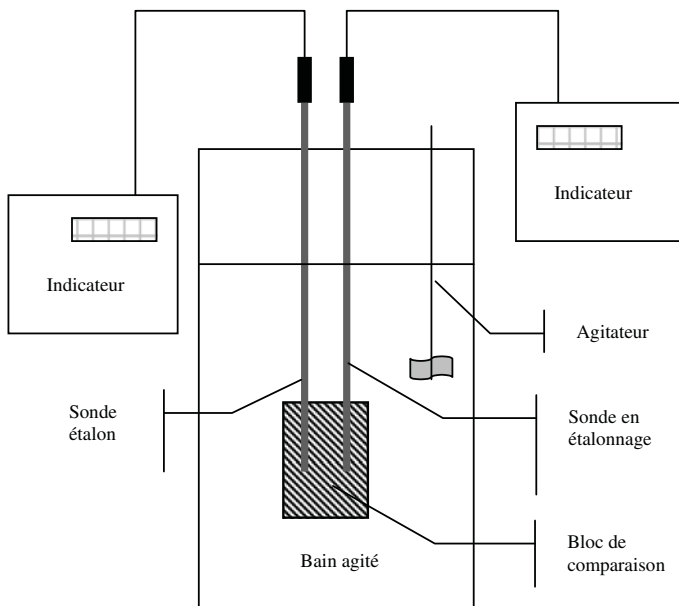


Figure 1.1 Étalonnage par comparaison. Principe.

Son choix dépend de différents facteurs tels que le domaine de température, l'incertitude finale recherchée, les conditions spécifiques de l'étalonnage. La chaîne étalon doit faire l'objet d'un contrôle régulier de sa stabilité et être périodiquement raccordée aux étalons nationaux.

Les milieux de comparaison généralement utilisés sont :

- des bains liquides ;
- des bains à lit fluidisé ;
- des fours à résistance électrique ;
- des fours à caloducs ;
- des enceintes thermostatiques.

Remarques :

- Pour une gamme donnée de température, on aura toujours intérêt à préférer, à chaque fois que c'est possible, un bain liquide bien agité à un four classique.
- Les bains et fours peuvent être équipés d'un bloc d'égalisation thermique. Ce bloc, réalisé dans un matériau choisi en fonction de ses qualités thermiques et du domaine d'utilisation, permettra l'amélioration locale de la stabilité et de l'homogénéité thermique.
- Dans le cas des fours à résistances électriques, on obtiendra une meilleure uniformité en température axiale en utilisant des fours multi-enroulements.
- Les diamètres des puits dans lesquels sont placés les capteurs étalons et à étalonner doivent être adaptés aux dimensions de ces instruments.
- Le milieu de comparaison doit être caractérisé. Les paramètres suivants doivent être analysés :
 - > la stabilité de la température ;
 - > l'homogénéité en température dans tout l'espace susceptible d'être utilisé lors d'un étalonnage.

Cette caractérisation doit être faite périodiquement pour tenir compte des modifications dans le temps des caractéristiques thermiques du générateur. La caractérisation doit être faite en utilisant des chaînes de températures dont les caractéristiques métrologiques (stabilité, résolution etc.) sont compatibles avec les performances supposées du milieu de comparaison. Au cours du temps, les caractéristiques thermiques d'un bain ou d'un four sont susceptibles d'évoluer. Par exemple, la viscosité du fluide utilisé peut se dégrader lors des cyclages thermiques. Les caractéristiques thermiques du milieu de comparaison doivent donc faire l'objet d'un contrôle périodique. On trouvera de plus amples conseils sur ce sujet dans le fascicule de documentation de l'AFNOR FD X 07-028, 2002 [1.3].

- Dans le cas de l'utilisation d'un four, il est indispensable d'étudier le profil thermique dans les puits où sont introduits les capteurs. Le profil thermique doit être exploré sur une longueur compatible avec la longueur des sondes à étalonner. Cette étude permettra d'estimer la valeur de la composante d'incertitude liée aux

défauts d'homogénéité en température selon l'axe du puits. Ce point est particulièrement important dans le cas des fours portables pour lesquels la profondeur d'immersion est généralement limitée.

Il faut également examiner la répartition radiale des températures.

- Pour les enceintes climatiques, les caractéristiques thermiques du volume de travail devront être soigneusement étudiées.
- Les bains les plus adaptés à l'étalonnage des thermomètres à dilatation de liquide sont les bains liquides à débordement. Ce type de bain facilite la lecture des thermomètres au degré lu (possibilité de réduire au maximum la colonne émergente et diminution des erreurs de parallaxe sur la lecture).
- La profondeur d'immersion des sondes doit être adaptée à la longueur de l'élément sensible et aux caractéristiques thermiques du milieu de comparaison.
- La fréquence d'acquisition des mesures doit être compatible avec l'incertitude liée à la stabilité du milieu de comparaison.
- Pour s'assurer que la profondeur d'immersion est suffisante, l'opérateur doit modifier cette dernière d'une longueur au moins égale à celle de l'élément sensible et s'assurer que la variation de lecture entraînée reste nettement inférieure à l'incertitude finale recherchée.
- La longueur des éléments sensibles du capteur de référence et du capteur à étalonner peuvent différer notablement. Cette situation peut entraîner des erreurs importantes. Dans la mesure où l'on peut déterminer la dimension des éléments sensibles, on place le milieu géométrique de ces derniers dans le même plan.
- Avant de relever les mesures, il faut s'assurer que le thermomètre étalon et le thermomètre à étalonner sont en équilibre thermique avec le milieu de comparaison dans lequel ils sont placés. Selon les conditions expérimentales, le temps de mise en équilibre thermique sera plus ou moins long. Généralement, il est de plusieurs dizaines de minutes.
- Il ne faut pas oublier que les caractéristiques thermiques du milieu de comparaison peuvent dépendre du nombre et de la géométrie des capteurs présents. En conséquence, on doit s'assurer que les conditions au moment de l'étalonnage correspondent bien aux conditions dans lesquelles le milieu a été caractérisé.

Les dimensions géométriques du capteur en étalonnage peuvent être notablement différentes de celles des instruments utilisés pour caractériser thermiquement le bloc de comparaison. Dans ce cas, les échanges thermiques entre chacun de ces capteurs et les milieux les entourant (milieu de comparaison, espace entourant le milieu de comparaison etc.) peuvent être très différents. Les composantes d'origine thermique doivent alors être de nouveau évaluées dans les conditions expérimentales de l'étalonnage.

1.4 Évaluation de l'incertitude type par une méthode de type B

Pour plus d'information concernant le vocabulaire utilisé dans cet ouvrage, on se rapportera au *Vocabulaire international de métrologie* [1.4].

Avant d'établir un bilan d'incertitude, il est indispensable de prendre connaissance des règles et des méthodes développées dans le GUM (*Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement* ; *Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* ; JCGM 100:2008) et repris dans la norme NF ENV 13005 [1.5]. Seules quelques règles seront rappelées ici.

Dans le cas des méthodes de type B, l'incertitude type est évaluée par un jugement scientifique basé sur toutes les informations dont on dispose concernant le phénomène physique considéré.

Dans le cas des étalonnages de capteurs de température, outre la loi dite « loi normale » utilisée pour chiffrer la composante liée à la répétabilité de la mesure (fidélité de la mesure selon un ensemble de condition de répétabilité), deux autres lois sont fréquemment appliquées :

- la loi rectangulaire symétrique : il est seulement possible d'estimer les limites supérieure et inférieure de la quantité X concernée. On fait l'hypothèse que la valeur de X ne peut pas se situer en dehors de l'intervalle défini par ces limites et qu'il est raisonnable de penser que X peut prendre n'importe laquelle des valeurs comprises dans cet intervalle avec la même probabilité. Dans ce cas, l'incertitude type est calculée en divisant cet intervalle par $2\sqrt{3}$;
- la loi rectangulaire non symétrique : c'est le cas par exemple des dérives dans le temps des instruments de mesure. La valeur utilisée pour la quantité X se situe à l'une des bornes de l'intervalle. Les mêmes hypothèses que pour la loi ci-dessus sont faites. Dans ce cas, l'incertitude type est calculée en divisant l'intervalle par $\sqrt{3}$.

Naturellement, si des données objectives permettent d'accéder à une meilleure connaissance de la loi de distribution, les lois ci-dessus peuvent être remplacées par d'autres lois plus judicieuses.

Dans la suite de ce chapitre, l'incertitude élargie (en considérant un facteur d'élargissement k) sera notée U_i et l'incertitude type u_i .

1.5 Cas pratique : étalonnage d'une chaîne de température comportant une sonde à résistance de platine à l'aide d'une chaîne étalon également munie d'une sonde à résistance de platine

1.5.1 Caractéristiques des sondes à résistance de platine

Avant d'entreprendre l'étalonnage d'une sonde à résistance de platine, il sera pertinent de prendre connaissance de divers documents traitant de la technologie et des

fonctions d'interpolation associées à ce type de capteur [1.6-1.10]. L'élément sensible d'une sonde à résistance de platine est constitué d'un fil de platine bobiné. Le fil est bobiné pour réaliser un élément sensible de quelques centimètres de long. La liaison avec l'appareil de mesure est réalisée par l'intermédiaire de 2, 3 ou 4 fils suivant le montage choisi par le fabricant (figure 1.2). Le montage dit « à 2 fils » doit être évité car il existe des risques importants d'erreurs liées à ce type de montage. En effet, la résistance de fils de ligne évolue en fonction de leur température et va donc nécessairement varier entre les conditions d'étalonnage et d'utilisation. Le montage dit « en 3 fils » peut être utilisé si certaines conditions sont respectées. Les trois fils de liaison utilisés doivent impérativement avoir la même longueur, le même diamètre et être de même nature. Le montage « en 4 fils », deux fils pour la conduction du courant, deux fils pour la mesure de la tension, conduira aux incertitudes d'étalonnage les plus faibles.

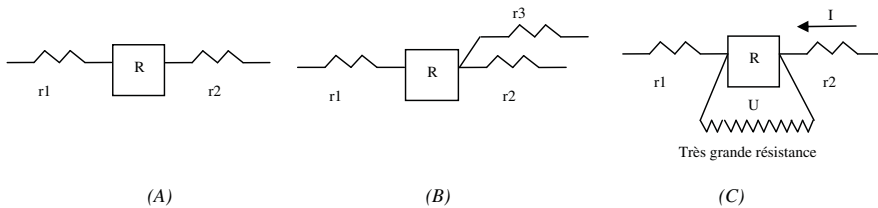


Figure 1.2 (A) : montage 2 fils (on mesure $r1 + R + r2$)
 (B) : montage 3 fils (on mesure $X = r1 + R + r2$, puis $Y = r2 + r3$, on calcule $R = X - Y$)
 (C) : montage 4 fils (on mesure R).

Lorsqu'on entreprend l'étalonnage de ce type de capteur, il ne faut pas oublier que :

- l'élément sensible n'est pas nécessairement positionné au bout de la gaine métallique ;
- le capteur peut présenter un défaut d'isolement électrique ;
- à basse température, il peut apparaître un phénomène de condensation pour les capteurs dont l'étanchéité n'est pas suffisante.

La mesure de la résistance, d'une sonde à résistance de platine, impose la circulation d'un courant qui entraîne, par effet joule, un échauffement de l'élément sensible. L'erreur ainsi introduite dépend de la vitesse avec laquelle l'énergie peut se dissiper dans le milieu contrôlé en température. Cette erreur, appelée d'auto-échauffement, est fonction des caractéristiques de la sonde et des conditions d'échange thermique avec le milieu. Lorsque la sonde est étalonnée seule, les ohmmètres utilisés pour la mesure de la résistance électrique aux bornes des sondes lors de l'étalonnage et lors de la mise en œuvre peuvent délivrer des courants notablement différents. Dans ce cas, les mesures doivent être effectuées avec deux valeurs de courant permettant ainsi d'extrapoler la valeur de la résistance pour un courant nul.

Tableau 4.2 Liste des composantes d'incertitudes avec les lois associées pour l'utilisation de la méthode de Monte Carlo.

Désignation de l'incertitude	Loi de distribution	Plage de variations
Répétabilité	Gaussienne	± 420 nm
sur la longueur d'onde dans le vide de la source laser	Uniforme	$\pm 8,5 \cdot 10^{-9} \cdot L$
due à la température l'air : $\pm 0,2$ °C ($0,93 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2$)	Arcsinus	$\pm 0,2$ °C
due à la pression atmosphérique : ± 100 Pa ($0,0027 \cdot 10^{-6} \cdot 100$)	Gaussienne	± 100 Pa
due à l'hygrométrie de l'air : ± 10 % ($0,88 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1$)	Uniforme	± 10 %
due aux formules de calcul de l'indice de l'air	Uniforme	$\pm 0,03 \cdot 10^{-6} \cdot L$
sur la longueur d'onde de l'air	Gaussienne	$\sigma = 0,17 \cdot 10^{-6} \cdot L$
sur la quantification et d'interpolation du système laser valeur initiale ($q=100$ nm)	Uniforme	± 100 nm
sur la quantification et d'interpolation du système laser valeur de la mesure ($q = 100$ nm)	Uniforme	± 100 nm
due aux défauts d'alignement du faisceau laser	Gaussienne	$\pm 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot L$
due à l'incertitude sur la température de l'objet mesuré	Arcsinus	$\pm 0,2$ °C
due à l'incertitude du coefficient de dilatation	Gaussienne	$\pm 1,41 \cdot 10^{-6} \cdot L$
due à l'écart à 20 °C	Arcsin	± 1 °C
sur les corrections de déformations de contact	Gaussienne	± 60 nm
sur la longueur de la cale de 5 mm servant de référence	Gaussienne	± 30 nm

Pour chacune des composantes listées dans le tableau (4.2), l'incertitude type est déterminée en utilisant les informations délivrées dans le supplément 1 du GUM [4.1]. L'incertitude composée est ainsi déduite, l'incertitude élargie est estimée avec un niveau de confiance de 95 %.

Pour $L = 5$ mm : $u_c = 0,16$ μm $U = 0,34$ μm ;

Pour $L = 1$ m : $u_c = 1,6$ μm $U = 3,27$ μm .

En faisant passer une droite par ces 2 points, on obtient alors :

$$u_c = 0,153 \mu\text{m} + 1,447 \cdot 10^{-6} \cdot L ;$$

$$U = 0,31 \mu\text{m} + 2,9 \cdot 10^{-6} \cdot L.$$

Dans cet exemple, les résultats sont cohérents avec ceux obtenus dans le paragraphe 4.9. par la méthode du GUM [4.10].

4.11 Documents de référence

- [4.1] JCGM 101, Évaluation des données de mesure – Supplément 1 du « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure » - Propagation de distributions par une méthode de Monte Carlo, 2008.
- [4.2] NF EN 60825-1 Sécurité des appareils à laser - Partie 1 : classification des matériels et exigences, Afnor, 2008.
- [4.3] A. A. Michelson, Travaux et mémoires du BIPM Tome XI, Gautier-Villar, 1894.
- [4.4] B. Edlén, The refractive index of air, *Metrologia*, 2, 71, 1966.
- [4.5] K. P. Birch, M.J. Downs, An updated Edlén equation for the refractive index of air, *Metrologia*, 30, 155-162, 1993.
- [4.6] H. Barrels, J. E. Sears, The refraction and dispersion of air for the visible spectrum, *Phil. trans. royale Society London, série A* 238, 1, 1939.
- [4.7] A. Wexler, L. Greenspan, Vapor pressure equation for water in the range 0 to 100 °C, *Journal of Research of National Bureau of Standards*, vol. 75 A, n° 3, 1971.
- [4.8] Note d'application 325-2, Machine Tool Calibration Using the HP 5528 A Laser Measurement System, Hewlett-Packard – Application, 1989.
- [4.9] B. Joseph, Thermodynamique, Gauthier-Villars, Source Gallica.bnf.fr, Ecole Polytechnique, 1887.
- [4.10] NF ENV 13005 Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, Afnor, 1999.
- [4.11] C. E. Shannon, A mathematical theory of information, *Bell Systems Tech. J.* 27, 623–656, 1948.