

AVANT PROPOS

Le Ministère chargé de l'industrie, dans le cadre de sa procédure « Partenaires Pour l'Europe » a soutenu, en 1999, le projet de publication d'un recueil d'exemples d'évaluation d'incertitude d'étalonnage. Le Collège Français de Métrologie, réédite régulièrement depuis cet ouvrage. Le succès de ce document, est le signe d'un intérêt constant de la communauté des métrologues.

Les exemples présentés dans ce document ont été rédigés par des ingénieurs et des techniciens maintenant rassemblés au sein du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE). Ils s'adressent aux personnes chargées dans les laboratoires de métrologie d'évaluer, de justifier les incertitudes d'étalonnage et d'établir les meilleures possibilités d'étalonnage de leur laboratoire. Bien évidemment ce recueil pourra être utilisé par toute personne cherchant à approfondir ses connaissances dans le domaine de l'évaluation des incertitudes.

Depuis la publication par le Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) du Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (JCGM 100 :2008 GUM¹), on peut considérer que les utilisateurs disposent d'une référence reconnue au plan international. L'application de ce guide n'est pas toujours facile d'autant plus qu'il n'y a pas généralement de solution unique pour mener une évaluation d'incertitude. La publication de ce recueil d'exemples, doit permettre de montrer la diversité des approches possibles et de proposer des solutions concrètes. Il est souhaitable que le lecteur s'approprie les exemples et la démarche pour l'évaluation des incertitudes d'étalonnage. La compréhension de cette démarche lui permettra de devenir autonome pour transposer cette méthode à ses cas particuliers et ainsi être en mesure d'évaluer l'incertitude de ses propres étalonnages.

Le Collège Français de Métrologie espère que la nouvelle édition de ce recueil permettra de faire progresser l'ensemble de la communauté des métrologues.

Marc PRIEL
Directeur Honoraire de la Métrologie
Laboratoire national de métrologie et d'essais
Novembre 2013

¹ Evaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure JCGM 100 :2008 (GUM 1995 avec des corrections mineures), document téléchargeable sur le site du BIPM www.bipm.org

SOMMAIRE

EXEMPLES DU DOMAINE ÉLECTRICITÉ 1

- Étalonnage d'un ampèremètre3
- Étalonnage d'un millivoltmètre haute fréquence 11
- Étalonnage d'une résistance 19
- Étalonnage d'une résistance de haute valeur27
- Étalonnage d'un condensateur35
- Étalonnage d'un affaiblisseur fixe. Méthode par variation de puissance 43
- Étalonnage d'une source de bruit radioélectrique.....57
- Étalonnage d'un convertisseur thermique63
- Étalonnage d'une inductance71
- Étalonnage d'un calibrateur.....77

EXEMPLES DU DOMAINE MÉCANIQUE 85

- Mesure de cales étalons par comparaison mécanique87
- Étalonnage d'un manomètre métallique 105
- Étalonnage d'un pied à coulisse 113
- Étalonnage d'un capteur de pression à sortie électrique 121
- Étalonnage d'une fiole jaugée 131
- Étalonnage d'un micromètre 0-25 mm 141
- Estimation de l'incertitude pour l'utilisation d'une balance de pression 145
- Étalonnage d'un viscosimètre par comparaison directe à un viscosimètre étalon..... 151

EXEMPLES DU DOMAINE RAYONNEMENTS 159

- Étalonnage des luxmètres 161
- Étalonnage de radiomètres dans l'ultraviolet en éclairage énergétique à 365 nm 167
- Étalonnage des radiamètres 177
- Étalonnage des spectroradiomètres 183

EXEMPLES DU DOMAINE TEMPÉRATURE 193

- Étalonnage des thermomètres à résistance de platine 195
- Étalonnage des indicateurs de température par simulation électrique.....209
- Étalonnage d'un thermomètre numérique 223
- Étalonnage des couples thermoélectriques231

EXEMPLE DU DOMAINE CHIMIE 247

- Étalonnage en titrimétrie volumétrique249

EXEMPLES DU DOMAINE ÉLECTRICITÉ

ÉTALONNAGE D'UN AMPÈREMÈTRE

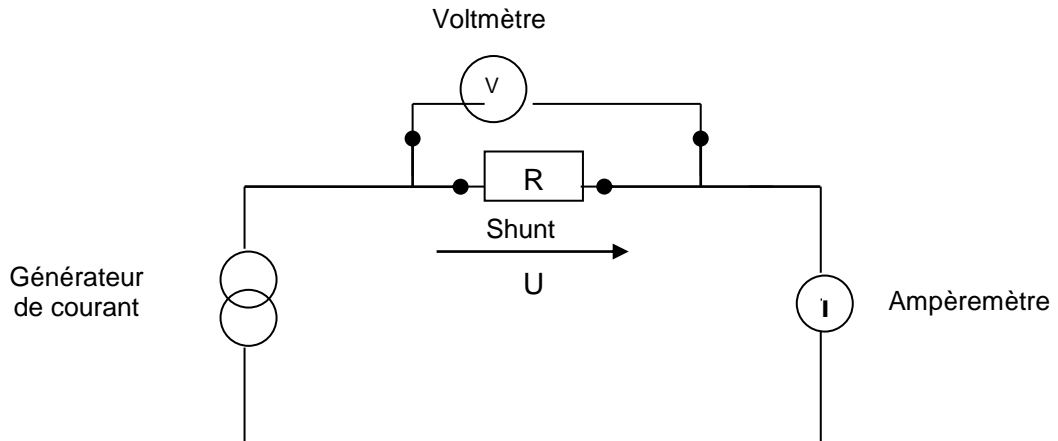
Isabelle BLANC, Laboratoire National de Métrologie et d'Essais

1. INTRODUCTION : PRÉSENTATION DE L'EXEMPLE

On se propose d'estimer l'incertitude d'étalonnage en courant continu d'un ampèremètre.

La méthode d'étalonnage consiste à comparer la valeur d'un courant connu à la valeur affichée sur l'ampèremètre en étalonnage.

Le principe de l'étalonnage est illustré par le schéma ci-dessous :



L'équipement requis est constitué d'une source de courant relativement stable, un shunt et un voltmètre numérique étalonnés.

La valeur du courant de référence est déduite de la loi d'Ohm.

La valeur nominale du shunt (R) est $0,1 \Omega$. L'incertitude avec laquelle il est étalonné est $2 \cdot 10^{-4} \cdot R$. La dérive dans le temps est estimée à $3 \mu\Omega$ par an. Son coefficient de température est évalué à $50 \cdot 10^{-6} \cdot R / ^\circ\text{C}$. Le shunt a été choisi pour supporter le courant le traversant sans échauffement.

Le voltmètre est étalonné avec une incertitude de $5 \cdot 10^{-5} \cdot U + 0,5 \mu\text{V}$. La résolution est $1 \mu\text{V}$. L'impédance d'entrée du voltmètre est supérieure à $1 \text{ G}\Omega$ et le courant d'entrée inférieur à 50 pA .

La stabilité de la source est $0,1\%$.

L'ampèremètre en étalonnage est un ampèremètre numérique de résolution $10 \mu\text{A}$ sur le calibre 2A . Sur ce calibre, la chute de tension maximale est $0,5\text{V}$.

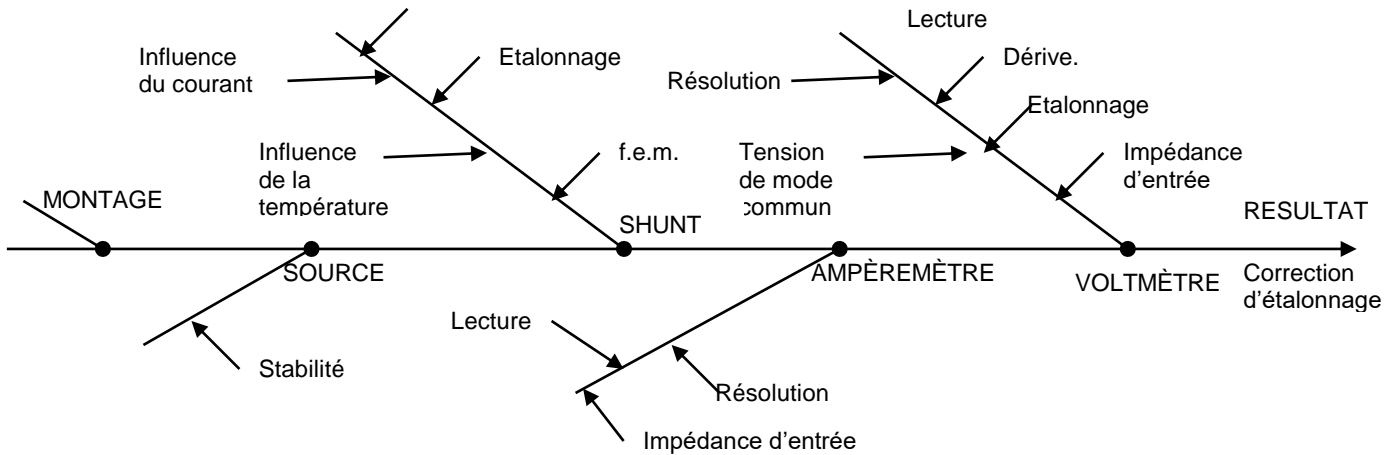
La température ambiante est de $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Considérons, pour la suite l'étalonnage du point 1A . La démarche proposée et l'évaluation de l'incertitude d'étalonnage s'appliquent de la même manière pour tout autre point.

2. ANALYSE DU PROCESSUS ET MODE OPÉRATOIRE

2.1. ANALYSE DES CAUSES D'ERREUR

A priori, des erreurs interviennent pour différentes causes. Ces différentes erreurs sont listées dans le schéma suivant :



2.2. MODE OPÉRATOIRE

L'opérateur réalise le montage. Le courant traversant le shunt et l'ampèremètre, l'opérateur relève simultanément la valeur de U (sur le voltmètre) et I (sur l'ampèremètre). Il répète l'opération 4 fois.

2.3. MODÉLISATION DU PROCESSUS DE MESURE

Le processus est modélisable en appliquant la loi d'Ohm.

Le courant traversant l'ampèremètre (I_a) est égal aux instabilités près de la source et aux fluctuations près de la lecture à :

$$I_a = \frac{U}{R}$$

U étant la tension mesurée aux bornes du shunt de valeur R.

Plus exactement :

$$I_a = \frac{\bar{I}_v + C_v}{R + C_R}$$

où \bar{I}_v est la valeur moyenne des lectures sur le voltmètre.

C_v la correction sur la tension lue sur le voltmètre.

C_R la correction sur le shunt.

La valeur du courant de référence est comparée à l'affichage sur l'ampèremètre. L'écart entre la valeur de référence et l'affichage est la correction δ qu'il faut appliquer à l'ampèremètre pour obtenir la valeur vraie :

$$\delta = \frac{\bar{I}_v + C_v}{R + C_R} - \bar{I}_a + C_I \quad (1)$$

où \bar{I}_a est la valeur moyenne des lectures sur l'ampèremètre.

C_I la correction correspondant à l'introduction de l'ampèremètre dans le montage.

Remarque : il conviendrait de considérer les erreurs introduites par le montage. Ces contributions (influence du bruit produit par les câbles de mesure, influence des courants de boucle,...) seront négligées par la suite.

Les lectures fluctuent aléatoirement (voltmètre, ampèremètre). Les valeurs lues étant proches, la correction qu'il faudrait leur apporter est supposée indépendante de ces lectures. L'incertitude-type associée est déterminée par une méthode de type A. Cette composante intègre les défauts d'instabilité de la source de courant.

C_V est la correction sur la tension lue sur le voltmètre.

Cette correction tient compte de l'étalonnage du voltmètre (valeur à tirer du certificat d'étalonnage). L'incertitude-type associée est déduite du certificat d'étalonnage.

La résolution du voltmètre, la dérive entre deux étalonnages et l'influence de l'impédance d'entrée du voltmètre et la tension de mode commun contribuent à l'incertitude de mesure.

C_R est la correction sur le shunt.

La correction à appliquer sur la valeur nominale de la résistance tient compte :

- de son étalonnage (valeur à tirer du certificat d'étalonnage),
- de la dérive entre deux étalonnages,
- de l'influence de la température, différente de celle d'étalonnage,
- de l'influence de la puissance (échauffement du shunt).

La résistance est étalonnée régulièrement. La correction est relevée dans le certificat d'étalonnage, ainsi que l'incertitude-type associée. La correction due à la dérive entre deux étalonnages est prise nulle et l'incertitude-type associée est déduite du suivi métrologique de la résistance.

Le coefficient de température du shunt est connu. Il est donc aisé de calculer et appliquer une correction sur la valeur du shunt et de lui associer une incertitude-type déduite des conditions d'environnement.

Le shunt a été étalonné pour différents courants de mesure. La valeur d'étalonnage sous un courant de 1A est donnée dans le certificat. On attribue à la correction une valeur nulle en lui associant une incertitude-type déduite des résultats d'étalonnage.

C_I est la correction correspondant à l'introduction de l'ampèremètre dans le montage

Du fait de l'introduction de l'ampèremètre dans le montage, le courant mesuré diffère de celui à mesurer.

La résolution de l'ampèremètre et l'influence des courants de fuite à l'entrée de l'ampèremètre contribuent à l'incertitude de mesure. On attribue à la correction une valeur nulle en lui associant une incertitude-type déduite des caractéristiques de l'ampèremètre.