

# AVANT PROPOS

---

Ce guide est publié dans le cadre d'un groupe de travail du Collège Français de Métrologie qui s'est réuni de 2010 à 2012.

L'objectif de ce document est d'aider les métrologues et les utilisateurs d'instruments de mesure à appréhender la nouvelle définition de l'étalonnage introduite par la troisième édition du Vocabulaire International de Métrologie (VIM)<sup>1</sup> et de fournir des éléments pour sa mise en œuvre au sein des laboratoires d'étalonnage.

De fait, ce guide constitue une introduction à la compréhension de la modélisation, de l'estimation et de la validation statistique nécessaire au traitement des exigences de cette nouvelle définition. Sans être exhaustif, il renvoie le lecteur aux documents de référence sur les sujets abordés pour les développements plus conséquents. La situation décrite est celle perçue par les membres du groupe de travail, les auteurs seront donc reconnaissants de tout avis ou remarques sur ce document.

Ce guide traite des cas où l'étalonnage s'exerce sur une étendue de mesure et nécessite une modélisation entre ces points d'étalonnage. Les autres types d'étalonnages comme celui d'une masse à laquelle va être affectée une seule valeur ne sont pas traités.

## Ont participé à la rédaction de ce guide

Raphael André – CEA/CESTA

Nicolas Bouillon – CT2M

Guy Clauss – ASPA

Thierry Coorevits – ENSAM PARIS TECH

Christophe Delacroix – VOLVO POWERTRAIN

Michèle Désenfant – LNE

Adrien Dugast – TRESKAL

Laurent Leblond – PSA

David Lelong – PSA

Pierre Otal – LNE

Jean-Michel Pou – DELTA MU

Marc Priel – LNE

Benoît Savanier – CETIAT

---

<sup>1</sup> JCGM 200:2012 : Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM) 3e édition

# SOMMAIRE

---

<b>1. INTRODUCTION - LE PROCESSUS D'ÉTALONNAGE ET DE MESURE</b>	<b>1</b>
1.1. La nouvelle définition de l'étalonnage	1
1.1.1. De VIM2 à VIM3 : une (r)évolution	1
1.1.2. Comment comprendre cette nouvelle définition ?	2
1.2. La mise en place d'un modèle	4
<b>2. CONSTRUIRE ET EXPLOITER UN MODÈLE D'ÉTALONNAGE</b>	<b>9</b>
2.1. Qu'est-ce qu'un modèle probabiliste ?	10
2.1.1. Formalisation	10
2.1.2. Le choix de la fonction de mesure et la description des erreurs aléatoires	12
2.2. Sens du modèle	13
2.2.1. Modèle direct	13
2.2.2. Modèle indirect	14
2.2.3. Illustration	16
<b>3. SPÉCIFIER ET VALIDER UN MODÈLE D'ÉTALONNAGE</b>	<b>19</b>
3.1. Trouver une « bonne » estimation des paramètres d'un modèle	19
3.1.1. Estimation sans biais des paramètres et estimation de leurs incertitudes	20
3.1.2. Estimation par régression des paramètres d'un modèle	23
3.2. Valider le modèle	37
3.3. Analyse des résidus et test du chi-deux	37
<b>4. CONCLUSION : PROPOSITION DE LIVRABLES D'UN ÉTALONNAGE</b>	<b>41</b>
<b>5. EXEMPLES</b>	<b>43</b>
5.1. Exemple 1 : Multimètre	43
5.1.1. Les conditions spécifiées	44
5.1.2. Modélisation de la fonction de mesure	46
5.1.2.1. Traitement suivant le chapitre 6 de l'ISO/TS 28037	47
5.1.2.2. Traitement suivant le chapitre 10 de l'ISO/DTS28037	50
5.1.2.3. Comparaison des méthodes des chapitres 6 et 10 de l'ISO/TS 28037	58
5.2. Exemple 2 : Manomètre	59
5.2.1. De la définition du VIM 2 au VIM 3 évolution possible de la présentation des résultats	59
5.2.2. De la nécessité de disposer de la fonction permettant de corriger l'indication pour obtenir une valeur de référence	60
5.2.3. Mise en œuvre de la méthode « GLS »	61
5.2.4. Expression du résultat	62
5.2.5. Conclusion : Présentation possible du résultat final	63
5.3. Exemple 3 : Comparateur électronique	64
5.3.1. Définition de la procédure d'étalonnage et évaluation des incertitudes sur les X et les Y	64
5.3.2. Évaluation de la signature du processus d'étalonnage	66

5.3.3.	Analyse des résultats - Conclusion sur les coefficients	67
5.3.4.	Analyse des résultats - Conclusion sur les résidus	69
5.3.5.	Conclusion générale	70
5.4.	Exemple 4 : Couple mètre	71
5.4.1.	Définition de la procédure d'étalonnage et évaluation des incertitudes sur les X et les Y	71
5.4.2.	Évaluation de la signature du processus d'étalonnage	72
5.4.3.	Analyse des résultats - Conclusion sur les coefficients	73
5.4.4.	Analyse des résultats - Conclusion sur les résidus	73
5.4.5.	Conclusion générale	73
5.5.	Exemple 5 : Thermomètre	74
5.5.1.	Définition de la procédure d'étalonnage et évaluation des incertitudes sur les X et les Y	74
5.5.2.	Évaluation de la signature du processus d'étalonnage	75
5.5.3.	Analyse des résultats - Conclusion sur les coefficients	77
5.5.4.	Analyse des résultats - Conclusion sur les résidus	78
5.5.5.	Conclusion générale	78
<b>ANNEXES</b>		<b>79</b>
<b>A - Un peu d'histoire ...</b>		<b>79</b>
<b>B - LES EFFETS QUI SE MANIFESTENT LORS D'UNE OPÉRATION D'ÉTALONNAGE</b>		<b>81</b>
<b>C - QUELQUES ÉLÉMENTS SUR LA MÉTHODE DU MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE</b>		<b>84</b>
<b>D - QUELQUES ÉLÉMENTS SUR L'APPROCHE BAYÉSIENNE</b>		<b>86</b>
<b>E - MODÈLE D'ÉTALONNAGE LINÉAIRE DIRECT À ÉTALONS INDÉPENDANTS</b>		<b>89</b>
<b>F - CLASSE D'ESTIMATEURS DES PARAMÈTRES D'UNE FONCTION AFFINE</b>		<b>90</b>
<b>G - QUELQUES EXPLICATIONS SUR LES PHÉNOMÈNES DE BIAIS DANS LE CAS DES FONCTIONS NON-LINÉAIRES</b>		<b>93</b>

## Table des figures

Figure 1 - Relation entre les indications de l'instrument et les valeurs des étalons .....	3
Figure 2 - Relation entre résultat de mesure et indication de l'instrument .....	4
Figure 3 - Exploitation d'un modèle direct .....	14
Figure 4 - Exemple d'observations .....	17
Figure 5 - Premier exemple d'estimation de la pente et de l'intercept d'une droite .....	22
Figure 6 - Deuxième exemple d'estimation de la pente et de l'intercepte d'une droite.....	23
Figure 7 - Comparaison d'un écart entre l'observation et la prédiction pour un coût quadratique et un coût absolu. ....	25
Figure 8 - Exemple d'ajustement linéaire avec un coût quadratique et coût absolu .....	26
Figure 9 - L'importance de la spécification des incertitudes pour la qualification d'un modèle.....	28
Figure 10 - Ajustement linéaire en prenant en compte l'incertitude variable sur les indications.....	29
Figure 11 - Ajustement linéaire en prenant en compte l'incertitude sur les étalons .....	32
Figure 12 - Comparaison des différentes méthodes d'estimation .....	35
Figure 13 - Synoptique du choix des méthodes .....	36
Figure 14 - Exemple de tests sur la variance des résidus.....	40
Figure 15 - Schéma de principe du montage d'étalonnage.....	44
Figure 16 - Tableau récapitulatif du fascicule FD X 07-025-2 : .....	45
Figure 17 - Tableau de résultats d'un étalonnage « première étape de l'étalonnage» .....	45
Figure 18 - Représentation des écarts mesurés en fonction des valeurs étalon .....	46
Figure 19 - Validation graphique suivant chapitre 6 de l'ISO/DTS28037 .....	48
Figure 20 - Graphique des résidus suivant chapitre 6 de l'ISO/DTS28037 .....	49
Figure 21 - Validation du point -10V .....	49
Figure 22 - Tableau de résultats d'un étalonnage obtenus sur le calibre 10 V : .....	50
Figure 23 - Tableau du bilan des causes d'incertitude pour la mesure à 10 V .....	51
Figure 24 - Tableau des estimations d'incertitude HO et LO .....	52
Figure 25 - Tableau de résultats des facteurs correctifs .....	56
Figure 26 - Validation graphique suivant le chapitre 10 de l'ISO/DTS 28037 .....	57
Figure 27 - Tableau d'étalonnage selon VIM 2 .....	59
Figure 28 - Tableau d'étalonnage suivant le VIM 3 .....	60
Figure 29 - Représentation des corrections .....	60
Figure 30 - Représentation des résidus .....	62
Figure 31 - Tableau d'incertitudes classique .....	81
Figure 32 - Exemple de prise en compte du caractère « HO » ou « LO » des causes d'incertitudes .	83
Figure 33 - Distribution du mesurande simulé 1 .....	93

# 1. INTRODUCTION - LE PROCESSUS D'ÉTALONNAGE ET DE MESURE

## 1.1. LA NOUVELLE DÉFINITION DE L'ÉTALONNAGE

### 1.1.1. De VIM2 à VIM3 : une (r)évolution

La seconde édition du vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie de décembre 1994 avait défini le concept d'étalonnage de la façon suivante :

#### 6.11 (6.13) étalonnage, m

*ensemble des opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs de la grandeur indiquée par un appareil de mesure ou un système de mesure, ou les valeurs représentées par une mesure matérialisée ou par un matériau de référence, et les valeurs correspondantes de la grandeur réalisée par des étalons.*

- *Note 1 : Le résultat d'un étalonnage permet soit d'attribuer aux indications les valeurs correspondantes du mesurage soit de déterminer les corrections à appliquer aux indications.*
- *Note 2 : Un étalonnage peut aussi servir à déterminer d'autres propriétés métrologiques telles que les effets des grandeurs d'influence.*
- *Note 3 : Le résultat d'un étalonnage peut être consigné dans un document parfois appelé certificat d'étalonnage ou rapport d'étalonnage.*

La troisième édition du Vocabulaire International de Métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés – (VIM) publiée en 2008 puis 2012 introduit une nouvelle définition pour le concept d'étalonnage :

#### 2.39 (6.11) étalonnage, m

*Opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication.*

- *Note 1 : Un étalonnage peut être exprimé sous la forme d'un énoncé, d'une fonction d'étalonnage, d'un diagramme d'étalonnage, d'une courbe d'étalonnage ou d'une table d'étalonnage. Dans certains cas, il peut consister en une correction additive ou multiplicative de l'indication avec une incertitude de mesure associée.*
- *Note 2 : Il convient de ne pas confondre l'étalonnage avec l'ajustage d'un système de mesure, souvent appelé improprement « auto-étalonnage », ni avec la vérification de l'étalonnage.*
- *Note 3 : La seule première étape dans la définition est souvent perçue comme étant l'étalonnage.*

Dans la définition du VIM 2, seule la première étape était considérée comme représentant l'opération d'étalonnage. La nouvelle définition, par sa seconde étape, place l'utilisateur au centre des préoccupations du laboratoire. Jusqu'à présent, l'opération d'étalonnage relevait plus d'un constat que d'une information opérationnelle : la correspondance entre les indications de l'instrument et les valeurs de l'étalon était observée, puis était laissé à l'utilisateur le soin de traiter et d'interpréter selon son besoin ces résultats. Dorénavant, il convient d'établir « **une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication** » permettant à l'utilisateur du certificat d'étalonnage, d'utiliser directement les informations fournies sans autres traitements.

Cette nouvelle définition répond mieux aux besoins pratiques de l'utilisateur d'un instrument de mesure, elle fournit la relation qui permet de calculer la valeur de la grandeur que l'on mesure à partir des indications de l'instrument.<sup>(2)</sup>

### 1.1.2. Comment comprendre cette nouvelle définition ?

Est-ce que ces deux étapes sont obligatoires ? Peut-on s'arrêter à l'étape 1 ? La note 3 nous conduit à penser que les rédacteurs du VIM3<sup>(3)</sup> ont souhaité faire évoluer les pratiques de la métrologie en proposant aux utilisateurs une définition réellement opérationnelle : les deux étapes constituent maintenant ce que l'on appelle un étalonnage.

Est-ce que la responsabilité des deux étapes peut être partagée ? Il s'agit d'une question de relation entre le laboratoire prestataire et son client. Par défaut, l'étalonnage comprend désormais ces deux étapes, qui sont à la charge du laboratoire prestataire, sauf accord contraire qui devra être explicitement spécifié dans la demande client à son prestataire.

---

<sup>2</sup> Le métrologue fournit un modèle, l'utilisateur peut comprendre que son instrument est ainsi raccordé à des références (très souvent le Système International d'unités) sur l'ensemble du domaine de validité du modèle. Aujourd'hui ce n'est formellement le cas en réalité qu'aux points d'étalonnage.

<sup>3</sup> Le VIM est conçu par le Joint Committee for Guides in Metrology WG2. Le groupe est composé de représentants des organisations suivantes : BIPM, ISO, IEC, IFCC, IUPAP, IUPAC, OIML, ILAC. Le VIM est en accès libre sur le site du BIPM : [www.bipm.org](http://www.bipm.org)

❖ Selon la **première étape** définie, il s'agit d'établir une relation résumée dans la figure suivante :

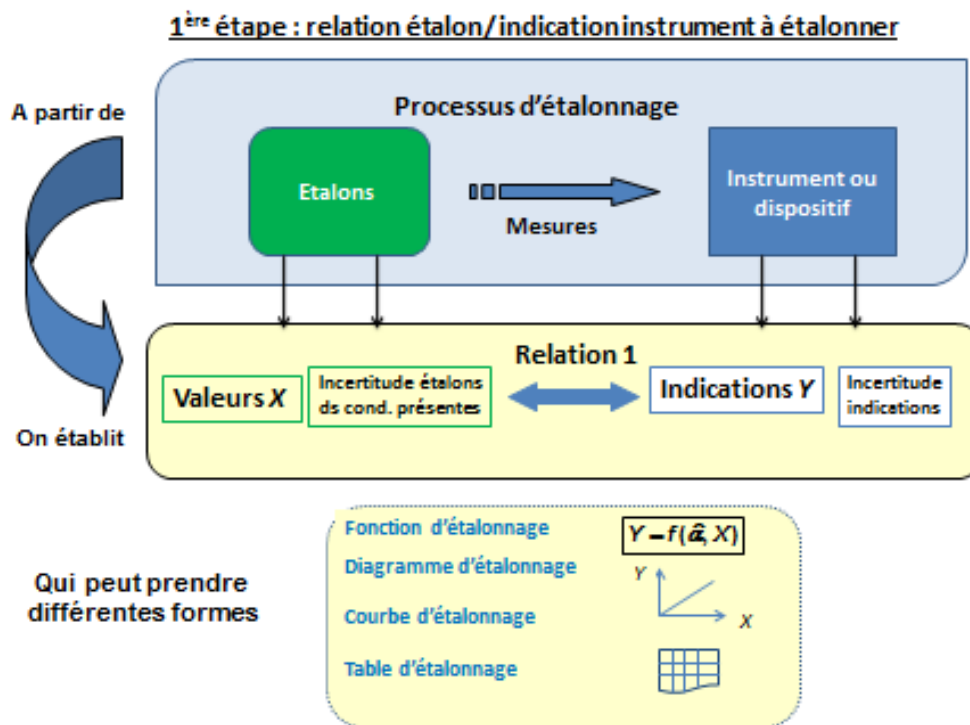


Figure 1 - Relation entre les indications de l'instrument et les valeurs des étalons

Dans la partie gauche de la figure 1 se trouvent les étalons avec leurs valeurs et leurs incertitudes utiles pour l'étalonnage en cours. Généralement, ces données proviennent du ou des certificats d'étalonnage des étalons auxquels sont ajoutées des incertitudes du processus d'étalonnage (dérive des étalons, homogénéité et/ou stabilité de l'environnement, ...). Dans la partie droite, se trouvent les indications correspondantes de l'instrument ou dispositif soumis à étalonnage. A minima, les composantes d'incertitude associées aux indications sont dues à la répétabilité et la résolution de l'instrument.