

LES GUIDES TECHNIQUES
DU COLLÈGE FRANÇAIS DE MÉTROLOGIE



APPLICATION DU NOUVEAU CONCEPT D'ÉTALONNAGE DU VIM 3

LES GUIDES TECHNIQUES
DU COLLÈGE FRANÇAIS DE MÉTROLOGIE

APPLICATION DU NOUVEAU
CONCEPT D'ÉTALONNAGE DU VIM 3

LES GUIDES TECHNIQUES
DU COLLÈGE FRANÇAIS DE MÉTROLOGIE



APPLICATION DU NOUVEAU CONCEPT D'ÉTALONNAGE DU VIM 3

© CFM et AFNOR Éditions 2017

Couverture : création AFNOR Éditions – Exécution : Atelier du Livre (Caroline Joubert)

Crédit photo © 2017 Adobe Stock

ISBN 978-2-12-465606-6



Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1^{er} juillet 1992, art. L 122-4 et L 122-5, et Code pénal, art. 425).

Collège Français de Métrologie
1, rue Gaston Boissier
75724 Paris Cedex 15
Tél. : + 33 (0) 4 67 06 20 36
www.cfmetrologie.com/fr/bibliotheque

AFNOR
11, rue Francis de Pressensé
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél. : + 33 (0) 1 41 62 80 00
www.afnor.org/editions



COLLÈGE FRANÇAIS DE
MÉTROLOGIE

Le Collège Français de Métrologie (CFM) est une association à vocation industrielle qui rassemble tous les acteurs du monde de la mesure : utilisateurs de moyens de mesure dans l'industrie et les laboratoires, responsables de laboratoires et de centres techniques, fabricants et prestataires, universitaires et autres.

Fondé avec le soutien du Ministère chargé de l'Industrie, du Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE), du Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques (CETIAT) et de Peugeot Citroën Automobiles (PSA), le CFM rassemble aujourd'hui près de 500 adhérents.

Apporteur d'informations et de contenu technique, notre mission est de vous permettre d'améliorer et d'optimiser vos processus de mesure. Les professionnels de tous niveaux et de tous les secteurs d'activités sont concernés.

Le but est de vous faire gagner du temps et de vous permettre de répondre au plus vite à vos interrogations.

Grâce à sa bibliothèque technique et notamment à ses Guides, le CFM est devenu la référence de la documentation dans le monde de la mesure.

Le rapprochement avec AFNOR Éditions, qui est lui aussi est un autre référent mais de la Norme, permettra aux deux entités de se compléter l'un et l'autre tout en gardant leurs niveaux d'exigence et tout en continuant d'améliorer les connaissances.

Véritable pôle d'échange qui facilite les rencontres et le partage d'expériences, intégrez vous aussi notre réseau en devenant l'un de nos membres privilégiés !

Visitez notre site Internet et analysez toute notre offre sur www.cfmometrologie.com.

**Prenez la mesure de votre avenir !
Le CFM**

afnor
ÉDITIONS

Vous ne connaissiez pas encore AFNOR en tant qu'éditeur ? Pourtant, depuis plusieurs années nous nous affirmons en tant qu'acteur de premier plan dans le paysage de la littérature professionnelle !

Face aux grandes tendances qui impactent votre environnement économique, nous vous offrons les meilleures solutions.

Dans un monde où les risques externes sont nombreux, AFNOR Éditions apporte de véritables solutions et méthodes pour aider les dirigeants dans leurs prises de décision.

Quels que soient votre secteur d'activité et votre fonction dans l'entreprise, nous vous proposons un ouvrage capable de satisfaire vos attentes. Pour répondre à vos problématiques, nous avons spécialement développé des collections pratiques. Celle coéditée avec le CFM est la dernière-née !

Cette collection vous assure les compétences des meilleurs experts et traite de l'ensemble des besoins auxquels vous êtes confrontés au quotidien.

Cette volonté d'accompagner votre développement et d'assurer votre pérennité est la marque de fabrique d'AFNOR Éditions. C'est notre mission.

Pour l'accomplir et la mener à bien, nous sélectionnons des auteurs experts et reconnus, ayant une véritable expérience de terrain.

Capables de transmettre simplement les outils, les méthodologies et les connaissances nécessaires, ils vous permettront d'aller de l'avant et d'améliorer vos performances.

Consultez sans tarder l'ensemble de notre catalogue de plus de 570 titres sur www.boutique.afnor.org/livres.

**Accédez au savoir en illimité !
AFNOR Éditions**

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)¹ 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

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

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION - LE PROCESSUS D'ÉTALONNAGE ET DE MESURE	1
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
2. CONSTRUIRE ET EXPLOITER UN MODÈLE D'ÉTALONNAGE	9
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
3. SPÉCIFIER ET VALIDER UN MODÈLE D'ÉTALONNAGE	19
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
4. CONCLUSION : PROPOSITION DE LIVRABLES D'UN ÉTALONNAGE	41
5. EXEMPLES	43
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
ANNEXES		79
A - Un peu d'histoire ...		79
B - LES EFFETS QUI SE MANIFESTENT LORS D'UNE OPÉRATION D'ÉTALONNAGE		81
C - QUELQUES ÉLÉMENTS SUR LA MÉTHODE DU MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE		84
D - QUELQUES ÉLÉMENTS SUR L'APPROCHE BAYÉSIENNE		86
E - MODÈLE D'ÉTALONNAGE LINÉAIRE DIRECT À ÉTALONS INDÉPENDANTS		89
F - CLASSE D'ESTIMATEURS DES PARAMÈTRES D'UNE FONCTION AFFINE		90
G - QUELQUES EXPLICATIONS SUR LES PHÉNOMÈNES DE BIAIS DANS LE CAS DES FONCTIONS NON-LINÉAIRES		93

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.⁽²⁾

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⁽³⁾ 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.

² 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.

³ 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

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

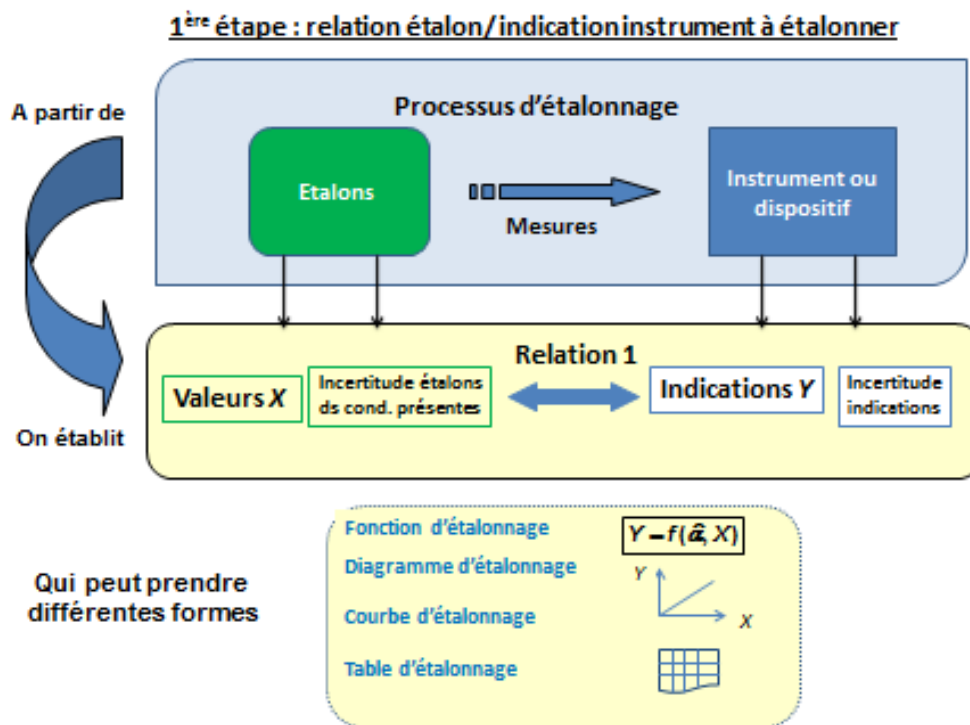


Figure 1 - Relation entre les indications de l'instrument et les valeurs des étalons

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.

- ❖ La **seconde étape** repose sur ces observations et s'avère délicate. L'objectif est d'obtenir une relation qui permette de relier n'importe quelle indication de l'étendue d'étalonnage à un résultat de mesure. Plusieurs méthodes peuvent être envisagées pour obtenir la relation mentionnée à l'étape 2. Cette étape de modélisation fait l'objet du chapitre 2.

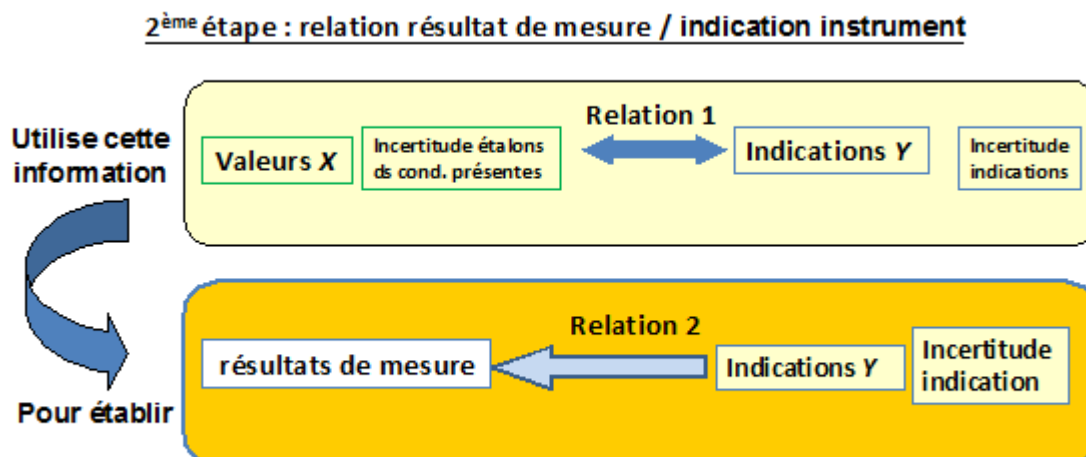


Figure 2 - Relation entre résultat de mesure et indication de l'instrument

Avec cette nouvelle définition de l'étalonnage qui conduit à choisir un modèle, à estimer et valider statistiquement ses paramètres à partir des données d'étalonnage, un rapprochement fort entre la métrologie et la statistique devient indispensable. Le métrologue doit acquérir de nouvelles compétences ou faire appel à des statisticiens pour bien maîtriser les techniques nécessaires à la mise en œuvre de l'étape 2. Il faut cependant insister sur le fait que le statisticien ne peut rien faire sans le métrologue et que toute modélisation doit s'appuyer sur une analyse des phénomènes physiques et dans le cas présent du comportement de l'instrument de mesure étalonné.

1.2. LA MISE EN PLACE D'UN MODÈLE

La précédente définition de l'étalonnage consistait à mettre seulement en relation les valeurs des étalons et celles des indications obtenues. Elle nécessite maintenant de franchir une étape supplémentaire par la mise en place d'un modèle qui estime le résultat d'une mesure à partir de n'importe quelle indication obtenue au sein d'un processus de mesure.

Le modèle doit être construit sur la base d'une comparaison entre les valeurs d'étalons et celles d'indications, obtenues au sein d'un processus d'étalonnage selon les points successifs détaillés ci-après :

1. Définir le domaine de fonctionnement du modèle,
2. Définir la fonction de mesure,
3. Choix des étalons en adéquation avec les incertitudes cibles, et nombre de points d'étalonnage,
4. Mettre en œuvre la comparaison expérimentale étalon - instrument,
5. Ajuster la fonction de mesure et valider le modèle ainsi défini,
6. Identifier et quantifier les facteurs d'incertitudes propres au processus d'étalonnage (que l'utilisateur ne retrouvera pas au sein de son processus de mesure).

Ces points constituent la "modélisation" devant être mise en place par le laboratoire d'étalonnage.

- En *premier lieu*, le laboratoire d'étalonnage et son client (interne ou externe) doivent définir le domaine de fonctionnement du modèle en fonction des besoins de mesure. Si le modèle fourni au client permet d'effectuer une prédiction du résultat de mesure en fonction de l'indication observée, il ne peut en aucun cas être utilisé en dehors de ce domaine. Sans information particulière, le laboratoire d'étalonnage pourra considérer comme domaine l'étendue totale de mesure de l'instrument, éventuellement sur chacun de ses calibres (pour les moyens multi-calibres) ou sur quelques calibres représentatifs, en justifiant de ses choix.
- Le *second point* consiste à définir une fonction de mesure qui met en relation des grandeurs d'entrée et des paramètres pour prédire une grandeur de sortie. Définir cette fonction signifie définir une forme analytique paramétrable qui est susceptible d'expliquer les observations qui seront réalisées. Dans la pratique actuelle, cette fonction de mesure est définie au regard des observations déjà réalisées. Les tableurs et leur outil d'analyse graphique permettent de tester différentes fonctions jusqu'à obtenir celle qui présente le meilleur ajustement aux points mesurés. Notons que la meilleure des fonctions, suivant cette stratégie, serait d'interpoler par une simple droite ce qui se passe entre deux points expérimentaux. La fonction obtenue devient alors une succession de segments qui passent par tous les points observés mais elle n'a alors aucun sens physique. Or, comme dans beaucoup de domaines, la physique doit l'emporter sur les mathématiques. Le choix de cette fonction doit « dépasser » l'observation expérimentale qui ne devrait être là que pour confirmer, ou infirmer, le résultat attendu. Aussi, en préalable à l'opération d'étalonnage, le métrologue devra savoir à quoi il doit s'attendre. **Il ne doit pas subir l'instrument en cours d'étalonnage, il présume de son comportement et s'assure que ses**

hypothèses préalables sont vérifiées. Dans le cas contraire, il devra investiguer pour déterminer les raisons de l'écart entre ses attentes et la réalité expérimentale.

- En *troisième lieu*, il convient de définir le nombre et les étalons qui vont permettre l'ajustement. La réponse à ces questions reste assez délicate et est plus souvent d'ordre empirique que scientifique malgré les articles de plans d'expérience dans ce domaine. Si le métrologue s'attend à une droite (cette information est disponible chez le fabricant qui connaît sa technologie, donc ses erreurs possibles), le nombre de points d'étalonnage pourra être réduit par rapport à une situation où il s'attendrait à un polynôme d'ordre trois ou plus. Plus les informations sont nombreuses, meilleure est l'estimation. Le niveau de « précision » attendu par l'utilisateur final impactera également sur le nombre de points ainsi que sur le nombre de répétitions en chaque point. Les méthodes proposées dans la littérature permettent, en utilisant ces différents constats, d'adapter une procédure au strict besoin du client pour obtenir le « juste prix ». Dans le cas où le client ne sait pas exprimer son besoin, l'étalonneur pourra déterminer le meilleur ratio coût/incertitude pour proposer une prestation optimale au regard de ses propres moyens d'étalonnage dont la qualité impacte l'ensemble des résultats et les conclusions obtenues.
- Le *quatrième point* concerne la partie purement expérimentale de l'étalonnage. Le laboratoire relève les indications (valeur mesurée et incertitude) que l'instrument en étalonnage fournit lorsqu'il est comparé à un étalon dans le cadre d'un processus d'étalonnage maîtrisé.
- *Cinquièmement*, ajuster la fonction de mesure signifie déterminer les paramètres du modèle, et leur incertitude respective (plus largement leur matrice de variance-covariance) en fonction des relations expérimentalement observées (valeurs et incertitudes des étalons, valeurs et incertitudes des indications). Cette activité est détaillée dans la partie suivante (§2). Tout modèle doit être validé. En effet, le traitement statistique appliqué pour estimer "au mieux" les paramètres va toujours donner un résultat. Il faut s'assurer que ce résultat est cohérent avec la connaissance que l'on a de l'instrument et des étalons, et que le client peut effectivement l'exploiter dans son domaine de validité.
- Le *dernier point* consiste à identifier et quantifier les facteurs d'incertitude propres au processus d'étalonnage. En effet, un étalonnage n'est qu'une mesure particulière au cours de laquelle un objet connu (l'étalon) est mesuré avec un instrument inconnu. L'écart entre indication de l'instrument et valeur étalon n'est pas, stricto sensu, l'erreur due « localement » à l'instrument mais l'erreur qui s'est produite, du fait de tous les facteurs du processus d'étalonnage, au moment de cette mesure. Il est donc nécessaire d'extraire, autant que possible, de ces erreurs obtenues lors de l'étalonnage, la part qui revient réellement à l'instrument de mesure. Il ne s'agit

pas en effet de modéliser, par exemple, l'effet de la température au moment de l'étalonnage (qui peut être différente de la température de référence) mais bien l'effet dû à l'instrument s'il existe.

La réflexion autour de l'évolution de la définition du mot « Étalonnage » remet donc en lumière une évidence parfois oubliée : les erreurs observées lors d'un étalonnage sont le fruit des erreurs de chacun des facteurs d'influence intervenant au cours du processus d'étalonnage. Aussi les erreurs dues au processus d'étalonnage viennent se mélanger aux erreurs propres de l'instrument. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle un procédé d'étalonnage est conçu pour minimiser ses propres erreurs au regard des performances des instruments à étalonner et donc à réduire son influence lors de l'étalonnage. L'approche statistique proposée dans ce document permet de mieux prendre en compte cette influence du processus d'étalonnage.

Enfin, la correction de l'instrument est une question particulièrement sensible en métrologie. Il faut garder en mémoire que les observations ne sont qu'une représentation de la réalité à un moment donné. Pour réaliser ces corrections, le métrologue se doit de les justifier statistiquement. Une correction effectuée « sur du bruit de mesure » peut conduire à un dérèglement de l'instrument ou du process et augmenter, par conséquent, les dispersions. Ce manque éventuel de discernement peut causer des instabilités artificielles qui ne permettent pas de comprendre les phénomènes réels. Il est donc impératif de maîtriser les outils permettant de prendre des décisions de correction ou non. Le présent document décrit les principes pour que ces décisions soient les plus fiables possibles. L'étalonneur doit ainsi être en mesure de renseigner l'utilisateur sur l'opportunité ou non de corriger les valeurs indiquées et, le cas échéant, de proposer le meilleur modèle possible au regard de la connaissance acquise. La correction peut alors se faire informatiquement (sur la base de la formule fournie) ou physiquement (si le moyen offre cette possibilité).

