

ET SI LE V.I.M (Vocabulaire International de la Métrologie) S'ETAIT TROMPE ?

Jean-Michel POU
DELTA MU Conseil
Parc Technologique La Pardieu
27, Rue Jean Claret
63063 – Clermont Ferrand Cedex
FRANCE

Résumé

Cet article propose une méthode d'évaluation des erreurs liées aux instruments de mesure différente de celle actuellement en vigueur dans les laboratoires d'étalonnage. Le V.I.M (Vocabulaire International de la Métrologie) définit l'erreur d'indication d'un instrument de mesure comme la différence entre la valeur mesurée et la valeur vraie, définition à l'origine des stratégies d'étalonnage et de vérification. Or, le même V.I.M définit l'erreur de mesure comme la différence entre la valeur mesurée et la valeur vraie. En appliquant cette deuxième définition aux opérations d'étalonnage, l'auteur montre qu'il est possible d'aller plus loin tant au niveau de l'analyse des résultats d'étalonnage que des conclusions des vérifications.

And if the V.I.M (International Vocabulary of the Metrology) was trunk?

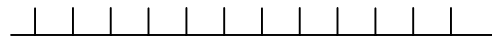
This article proposes a method for the evaluation of the errors, bound to measuring instruments, different from the currently used in the laboratories of calibration. The V.I.M (International Vocabulary of the Metrology) defines the error of indication of a measuring instrument as the indication of a measuring instrument minus a true value of the corresponding input quantity, the definition at the origin of the strategies of calibration and check. Now, the same V.I.M defines the error of measurement as the result of a measurement minus a true value of the measurand. By applying this second definition to the operations of calibration, the author shows that it is possible to go farther both at the level of the analysis of the results of calibration and conclusions of the checks.

Préambule

Un instrument de mesure, quel qu'il soit, a pour vocation de comparer un mesurande à une unité de référence. Ainsi, tout instrument de mesure est doté d'un système permettant de **diviser** l'unité de référence à laquelle il compare : **ses graduations**.

Tout instrument de mesure peut donc être représenté sous la forme d'une succession de traits de graduation, du plus simple réglet à la chaîne de mesure la plus complexe où le

digit de l'afficheur numérique peut être lui aussi représenté par une graduation suivant le schéma ci-dessous :



A partir de cette représentation schématique, le fabricant d'instruments de mesure peut être considéré comme un fabricant de graduations qu'il met bout à bout. Ainsi, les graduations *qu'il fabrique* se trouvent entachées des erreurs habituelles rencontrées dans tous les process de production :

Des erreurs de type aléatoire :

Ces erreurs sont générées par la dispersion des processus, dispersions dues à l'environnement de la fabrication (Matière, Milieu, Main d'œuvre, Méthode et Moyen de fabrication). Résultant de l'ensemble de ces facteurs, pouvant être considérés comme indépendants, elles se présentent généralement sous la forme de lois normales, **pouvant être quantifiées par des écart-types** (Cf Théorème Central Limite) sous réserves que l'un des facteurs ne soit pas largement majoritaire.

Chaque graduation du système est donc entachée d'une erreur de ce type qu'il ne sera évidemment pas possible de corriger car pour cela, il faudrait étalonner chaque graduation.

Des erreurs de type systématique :

Comme dans toute fabrication, il peut exister un décentrage entre la valeur à obtenir pour chaque graduation (la résolution) et celle réellement obtenue. Ce décentrage est à l'origine d'une erreur systématique qui, en se reportant de graduation en graduation, peut éventuellement être modélisée afin d'être corrigée.

Si l'erreur est constante, la correction de l'instrument de mesure sera de type linéaire (Correction = **b** x Indication où **b** représente le facteur de correction). On peut imaginer des erreurs de graduation qui ne sont pas constantes et qui peuvent se propager sous la forme de modèles de correction plus complexes (Polynômes d'ordre n , modèle logarithmique, exponentiel, hyperbolique, ...). En électronique, on définirait ces erreurs comme **des erreurs de gain ou d'amplification**.

A ces erreurs peut s'ajouter, dans le cas des instruments qui ne peuvent se régler sur un point physique (pied à coulisse à vernier, par exemple), une erreur liée au décalage du zéro qui conduit, associée aux erreurs précédentes, à une correction de la forme : $\text{Correction} = a + b \times \text{Indication}$ (où a représente l'erreur liée au décalage du zéro) pour le modèle le plus simple. En électronique, on définirait cette erreur comme **une erreur d'offset**.

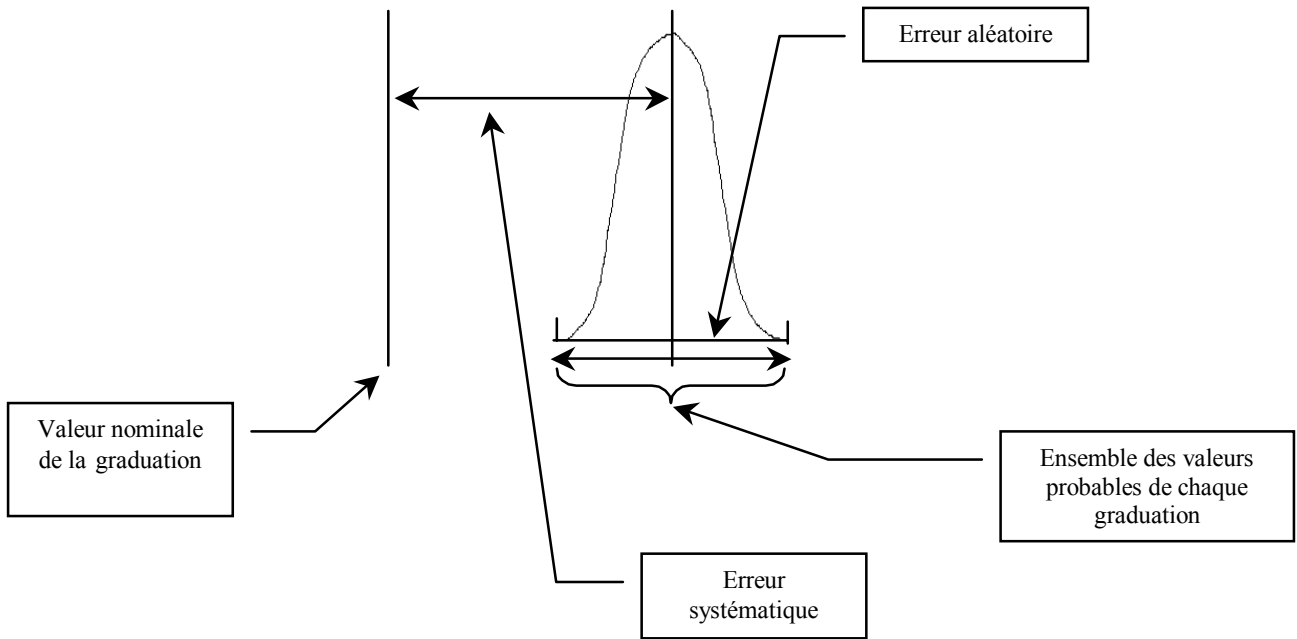


FIGURE 1

Evidemment, et en fonction de la technologie de l'instrument, il peut exister bien d'autres erreurs qui ne sont pas liées au système de graduations : hystérésis, parallélisme de touches, etc ...

L'ETALONNAGE DES INSTRUMENTS

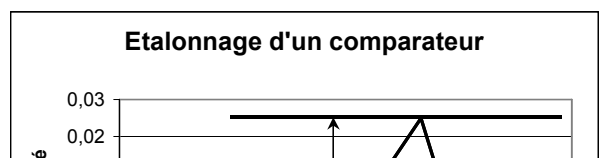
L'étalonnage de l'instrument de mesure doit donc permettre de mettre en évidence ces deux types d'erreur : **aléatoire** et **systématique**.

Le V.I.M [1] définit l'erreur d'indication de l'instrument de mesure comme étant l'indication d'un instrument de mesure moins une valeur vraie de la grandeur d'entrée correspondante (Définition 5.20).

Ainsi, et conscient du fait qu'il est impossible de réaliser des mesures sur chacune des graduations qui composent l'instrument, seul un certain nombre d'entre elles sont observées et les conclusions de l'étalonnage portent donc uniquement sur une partie de l'instrument.

Dans le cadre des normes françaises concernant les instruments de mesure dimensionnel, on relève uniquement, et conformément à la définition du V.I.M, l'erreur maximale d'indication, c'est à dire l'écart le plus grand observé entre valeur mesurée et valeur conventionnellement vraie sur l'ensemble des points mesurés. On ne cherche habituellement pas, au travers des résultats obtenus, à modéliser l'éventuelle erreur de type systématique qui pourrait permettre d'effectuer des corrections (Le sujet de la modélisation des courbes d'étalonnage fait l'objet d'une conférence dans le cadre du congrès 2001 : «En route vers le bon usage de la modélisation des courbes d'étalonnage» [2]).

Dans le cas des instruments réglables à « zéro », les écarts mesurés sont fonction de l'erreur individuelle de la graduation choisie pour origine au moment de l'étalonnage. C'est pourquoi la norme NF E 11-050 [3] traitant des comparateurs définit l'erreur de justesse totale d'un comparateur comme la différence des ordonnées maximale et minimale de la courbe d'étalonnage. En effet, à l'utilisation, il est possible que l'utilisateur se règle sur la graduation de plus grande erreur maximale et réalise sa mesure sur la graduation d'erreur minimale (il n'aurait pas de chance, certes, mais c'est possible !) ou le contraire (d'où le signe \pm d'une erreur ainsi définie) !



AUTRE APPROCHE

La recherche des différentes erreurs de l'instrument passe évidemment par des mesurages qui, comme tous les mesurages, sont entachés d'incertitudes de mesure : les incertitudes d'étalonnage. En effet, le processus mis en œuvre lors des opérations d'étalonnage n'est qu'un processus de mesure, processus de mesure particulier dans le sens où les différents facteurs (Milieu, Opérateur, Mesurande, ...) sont adaptés pour influencer le moins possible la qualité, l'incertitude, du résultat.

Néanmoins, l'incertitude d'étalonnage n'est jamais nulle, évidemment, et le résultat de l'étalonnage d'un instrument mesureur se présente sous la forme :

$$\text{Erreur Maximale d'Indication} = X \pm U_{\text{Etalonnage}}$$

Note : L'étalonnage peut également conduire à un résultat concernant l'erreur de type systématique, résultat devant être lui aussi présenté avec son incertitude associée [2].

Or, cette présentation pose trois problèmes :

1. Dans le cadre d'une vérification, $U_{\text{Etalonnage}}$ devrait être considérée suivant les préconisations de la norme ISO 14253-1 [4] ce qui peut poser certains problèmes lorsque les limites auxquelles est comparée l'erreur de l'instrument n'ont pas été considérées en tenant compte des incertitudes d'étalonnage.
2. L'étalonnage de l'instrument conduit à l'expression d'une erreur maximale d'indication, erreur qui devra être traduite en écart type à partir d'une loi de distribution que le métrologue devra attribuer à l'instrument, sans pour autant avoir tous les éléments nécessaires à la réflexion. Ainsi, l'influence réelle de l'instrument dans le processus de mesure pourra être sur-évaluée ou sous-évaluée par le choix de la loi de distribution.
3. Cette approche ne tient pas compte du fait que l'étalonnage est, dans tous les cas, réalisés sur un faible nombre de points par rapport au nombre de points possibles. L'erreur que l'on pense maximale sur l'échantillon étudié peut être sans commune mesure avec la réalité.

Nous avons rappelé que le V.I.M définissait l'erreur d'indication d'un instrument de mesure comme étant la différence entre la valeur mesurée et la valeur conventionnellement vraie de l'étalon (ce qui n'est pas applicable aux instruments de mesure réglables comme exposé ci-avant).

Or, il définit également l'erreur de mesure (Définition 3.10) comme étant le résultat d'un mesurage moins une valeur vraie du mesurande. A la réflexion, cette définition est en contradiction avec la définition précédente.

En effet, l'erreur de mesure (écart entre valeur mesurée et valeur vraie) ne peut être imputée uniquement à l'erreur d'indication de l'instrument de mesure (écart entre valeur mesurée et valeur conventionnellement vraie). Ainsi, lorsqu'on étalonne un instrument, les écarts que l'on observe ne sont pas les erreurs d'indication de l'instrument. ils sont les erreurs de mesure d'un processus utilisant, dans les conditions d'étalonnage, l'instrument à étalonner. Ces écarts trouvent donc leur origine, non seulement dans les erreurs de l'instrument mais également dans l'ensemble des incertitudes provenant des autres contributeurs : milieu, opérateurs, méthode, matière, etc ...

S'il fallait dresser le bilan des causes d'incertitudes du processus d'étalonnage (composé de l'instrument à étalonner et des conditions d'étalonnage), on quantifierait tous les facteurs connus (les facteurs propres au laboratoire) et il resterait comme seule inconnue la contribution de l'instrument. La variance d'un tel processus s'écrit alors de la façon suivante :

$$V_{\text{processus}} =$$

Vopérateur	<i>Quantifiable</i>
+ Vméthode	<i>Quantifiable</i>
+ Vmilieu	<i>Quantifiable</i>
+ Vinstrument	Inconnue
+ Covariances	<i>Quantifiable</i>

Note : Les erreurs propres à l'instrument n'interviennent pas dans les termes de covariances car elles sont parfaitement indépendantes des autres facteurs.

En considérant les écarts mesurés (ou résiduels après correction éventuelle de la tendance) comme l'expression des erreurs de mesure en chaque point d'étalonnage (et non comme les erreurs d'indication de l'instrument), il est possible de déterminer l'écart type expérimental de ces erreurs (en appliquant, le cas échéant, un coefficient correcteur). Cet écart type expérimental est en fait représentatif de l'incertitude type du processus étudié.

Ainsi, il est possible d'estimer la variance instrument par la formule :

Vinstrument = (Coeff x Ecart type expérimental) ² - (ΣVarianceLabo+ ΣCovarianceLabo)

Evidemment, cette démarche amène à se poser différentes questions :

1. **Le seuil de détection** : en effet, un instrument dont les erreurs intrinsèques seraient faibles devant les autres facteurs du processus d'étalonnage ne perturberait pas la variance globale et pourrait être considéré, de façon erronée évidemment, comme parfait. Ainsi, à chaque processus d'étalonnage devrait être associée une limite de détection qui pourrait être considérée comme la variance minimum de l'instrument étalonné.
2. **L'évaluation des variances et covariances laboratoire** : la technique actuelle consiste à évaluer en valeur maximale les différentes variances du processus d'étalonnage de façon à déterminer l'incertitude maximale sur le résultat. Dans cette méthode, une évaluation de la sorte aurait pour conséquence directe d'augmenter le seuil de détection et, par conséquent, de diminuer la variance réelle de l'instrument estimée par la différence des variances : si $(\Sigma \text{VarianceLabo} + \Sigma \text{CovarianceLabo})$ est majorée, $[(\text{Coeff} \times \text{Ecart type expérimental})^2 - (\Sigma \text{VarianceLabo} + \Sigma \text{CovarianceLabo})]$ est minorée.
3. **Le nombre de points d'étalonnage** : à ce jour, le nombre de points d'étalonnage est bien souvent choisi de façon empirique, sans trop de fondement scientifique. Dans cette méthode, ce nombre est directement associé au coefficient multiplicateur de l'écart type expérimental, donc au seuil de détection. Ainsi, il est possible d'adapter le coût de l'étalonnage aux valeurs réellement recherchées concernant l'instrument. Nous menons actuellement des études, sur la base de simulations numériques, pour évaluer les meilleurs rapports entre les incertitudes d'étalonnage, les erreurs de type aléatoire et systématique de l'instrument et le nombre de points d'étalonnage. Nous ne manquerons pas de publier les résultats dès qu'ils seront disponibles.

Conclusion

Cet article n'a pas pour prétention de définir une méthode éprouvée dans le cadre de l'étalonnage des instruments de mesure. Il se veut une piste de réflexion sur laquelle se retrouveront, je l'espère, quelques métrologues du fait des avantages nombreux qu'elle semble présenter :

1. Réflexion sur le nombre de points d'étalonnage et prise en compte, via l'écart type expérimental, du fait que seul un échantillon est observé.
2. Expression du résultat d'étalonnage sous la forme d'une variance, ou d'un écart type, de façon à répondre expérimentalement à la loi de distribution à associer aux erreurs intrinsèques de l'instrument.
3. Elimination de l'incertitude d'étalonnage, au dessus du seuil de détection, dans la déclaration de conformité de l'instrument.

Références

- [1] : Norme NF X 07-001 (1994) : « Vocabulaire International des termes fondamentaux et généraux de Métrologie »
- [2] : Congrès de Métrologie 2001 – Jean-Paul Senelaer – « En route vers le bon usage de la modélisation des résultats d'étalonnage »
- [3] : Norme NF E 11-050 (1990) : « Instruments de mesurage de longueur – Comparateurs mécaniques à cadran, à tige rentrante radiale – Spécifications – Méthodes d'essai »
- [4] : Norme ISO 14253-1 (1998) : « Vérification par la mesure des pièces et des équipements de mesure. Partie 1 : règles de décision pour prouver la conformité ou la non-conformité à la spécification »