

Le métier de métrologue

CALCUL D'INCERTITUDE ET DÉFINITION DES GRANDEURS D'INFLUENCE

Dans le précédent article, nous avons abordé l'importance de l'incertitude pour les exploitants de résultats de mesure et pour les équipes métrologie. Aujourd'hui nous allons nous arrêter sur une des étapes du calcul d'incertitude : la définition des grandeurs d'influence.

Cette étape est assez compliquée, car il s'agit de répondre à la question : « *qu'est-ce qui fait que je ne suis pas sûr de mon résultat de mesure ?* »

La plupart des personnes interrogées répondront : « *l'instrument !* » Elles n'auront pas tort. Comme nous n'utiliserons jamais « le mètre étalon⁽¹⁾ » pour mesurer, mais seulement une copie d'une copie d'une copie de cet instrument quasi parfait, l'outil que nous manipulerons pour réaliser le mesurage contribuera, par ses inévitables imperfections, à l'incertitude qui sera exprimée.

Ces mêmes personnes pourront alors estimer que l'évaluation de l'incertitude est terminée et s'arrêteront à l'EMT⁽²⁾ de l'instrument, qu'il n'y a plus d'autres facteurs qui contribuent à cette dernière. Ce raisonnement simple serait très rassurant, car il ferait porter à l'instrument toute la responsabilité de l'incertitude. Cette simplification est très confortable pour mettre en œuvre une fonction métrologie : « *Si l'incertitude de mesure est égale à celle de l'instrument, alors il suffit de mettre en place un système de contrôle des instruments pour la garantir.* » C'est cette réflexion qui a conduit à créer les fonctions métrologie traditionnelles que nous connaissons, c'est-à-dire la gestion d'étalonnages, la rédaction des procédures de vérification, les fiches de vie sur l'instrument et les étiquettes vertes collées sur les appareils.

LES EXPERTS



Jean-Michel POU

Président fondateur de la société Delta Mu, membre des commissions "Métrologie" et "Méthodes statistiques" de l'Afnor et président du cluster d'excellence "Auvergne Efficience Industrielle".



Frédéric AUTHOUART

Métrologue, coach et fondateur de l'entreprise Crisalis qui allie résolution technique et humaine d'une problématique

Néanmoins, avec un peu de pratique, on observe que l'instrument n'est pas le seul responsable de l'incertitude de mesure. Lorsque j'étais un métrologue en activité et que j'étalonnais les balances du laboratoire, je rencontrais parfois le cas suivant : je posais une masse étalon sur le plateau et j'attendais la stabilité pour relever la mesure. Parfois, sur certains postes de pesage, la stabilité ne venait pas. Pire, la variation de l'affichage était tellement forte que cela dépassait l'EMT associée à la balance.

Que faire ? Ajuster ? Changer la masse ? Probablement que ces actions n'auraient rien donné pour résoudre ce problème. La solution ? Elle était très simple à l'époque, couper la ventilation de la hotte sous laquelle était placée ma balance : miracle ! Les chiffres devenaient stables et permettaient de déterminer une erreur de justesse inférieure aux EMT : ma balance devenait conforme ! Je pouvais alors poser mon étiquette verte, incrémenter mes indicateurs qualité et rentrer

chez moi avec le sentiment du devoir accompli. Cependant, je n'étais pas fier de moi, car je savais que dès que j'aurais le dos tourné, l'utilisateur remettrait la hotte en fonctionnement et serait lui aussi soumis à ce problème d'instabilité lors de ses pesées. Quel était alors le sens de mon travail ? Était-ce de la métrologie utile ? Est-ce que je garantissais la confiance sur la pesée ? Sur la pesée de mon étalon, oui ; par contre sur celles de l'utilisateur, pas du tout.

Cet exemple illustre que le raisonnement « *incertitude de mesure = EMT de l'instrument* » est réducteur. Une proposition plus réaliste serait de dire : « *incertitude de mesure = EMT de l'instrument + incertitude de mise en œuvre* ». Derrière cette incertitude de mise en œuvre se cache tout ce qui va contribuer en plus de l'instrument à créer du doute autour du

(1) "Le mètre étalon" est ici utilisé comme l'image de l'unité de mesure parfaite.

(2) Erreur maximale tolérée.

résultat. L'ensemble « instrument + mise en œuvre » se nomme le processus de mesure. Il est parfaitement identifié dans la norme NF EN ISO 10 012⁽³⁾.

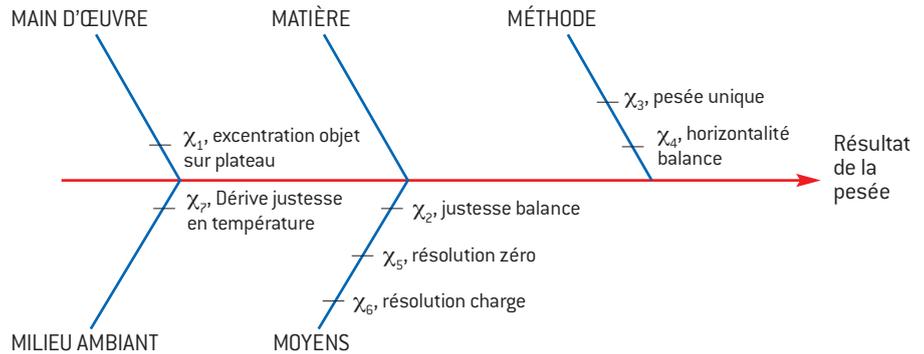
Identifier la liste des grandeurs d'influence

La première étape de l'évaluation des incertitudes de mesure consiste à décomposer son processus de mesure, c'est-à-dire identifier la liste des différentes grandeurs d'influence. Il s'agit d'exprimer tout ce qui contribue à l'imperfection de la mesure.

Pour réaliser cette décomposition, plusieurs outils sont à la disposition de l'utilisateur :

- l'exploitation du diagramme causes effets d'Ishikawa, appelé aussi méthode 5M ;
- les listes de grandeurs d'influence recommandées dans les normes.

Traditionnellement, la méthode 5M est la plus utilisée pour réaliser cette première étape. Elle fut créée par le professeur Kaoru Ishikawa (1915-1989) pour optimiser le niveau d'assurance qualité en entreprise. Elle est utilisée aussi en accidentologie pour réaliser les arbres des causes et c'est donc tout naturellement que les métrologues l'utilisent lorsqu'il s'agit de rechercher l'origine de l'incertitude.



Exemple classique d'un diagramme 5M pour l'évaluation de l'incertitude sur une pesée.

Elle consiste à représenter sur un diagramme en forme d'arêtes de poisson 5 grandes familles de causes de problèmes (dont la première lettre est M).

- méthode ;
- milieu ;
- matière ;
- moyen ou matériel ;
- main d'œuvre.

Dans le cadre d'un calcul d'incertitude, il s'agit de décomposer le processus de mesure au travers de cette grille de lecture. C'est une méthode qui apporte de la rigueur et qui limite les oublis de grandeurs d'influence.

Attention, ce diagramme n'a rien d'obligatoire ou de réglementé. Son utilisation a pour but d'aider à l'identification des

grandeurs d'influence. Les rubriques sont très souples et il ne faut pas dépenser d'énergie à se poser des questions métaphysiques sur la place de telle ou telle composante dans telle ou telle famille plutôt qu'une autre. L'approche 5M est là pour présenter les éventualités et limiter les risques d'oublis de cause d'incertitude.

De même, il ne faut pas vouloir à tout prix renseigner toutes les familles de causes. Parfois, vous n'identifieriez pas de grandeurs d'influence dans une rubrique. Cela ne veut pas dire qu'il n'y en a pas, mais qu'au moment où vous avez fait le travail, vous n'en aviez pas identifié. C'est pour cela que le calcul d'incertitude est une chose transparente et ouverte. Il est important de le partager, de discuter le fruit de votre réflexion avec d'autres personnes, le diagramme 5M peut alors devenir un bel outil de communication.

Les listes présentes dans les normes

Une alternative ou un complément à la méthode 5 M consiste à utiliser des check-lists. Ces dernières peuvent être très générales ou bien appliquées à des méthodes (cas des normes).

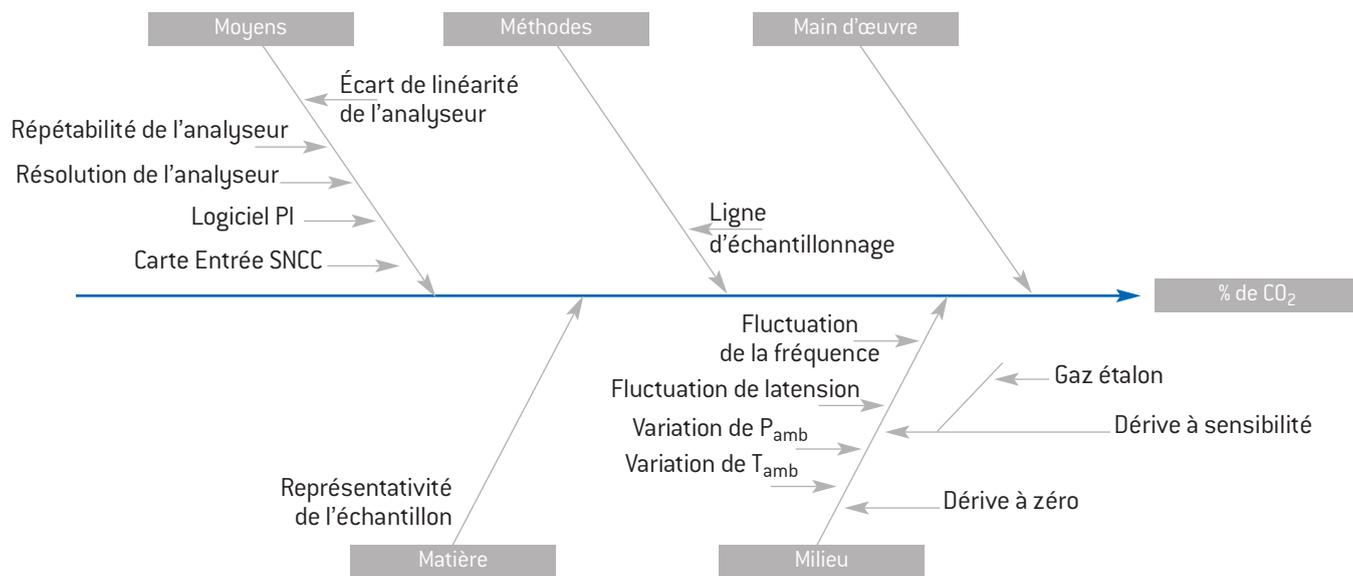
Ces listes de grandeurs d'influence ne peuvent malheureusement être données que pour des analyses ou des étalonnages dont la procédure est très cadrée.

Méthode	Instrument de mesure	Opérateur
Incertitude d'étalonnage Interpolation Calculs Reproductibilité Jonction de référence Dérive	Fidélité Erreur de modélisation Résolution Hétérogénéité Erreur d'origine thermique Colonne immergée	Erreur de lecture
Stabilité Homogénéité Corps Noir	Alimentation électrique Autres erreurs d'origine électrique Perturbations électromagnétiques Rayonnement solaire Température ambiante Humidité relative	
Milieu de comparaison	Environnement	

Incertitude de mesure →

Extrait de la norme FD X 07-028, Procédure d'étalonnage et de vérification des thermomètres, Estimation des incertitudes sur les mesures de température.

(3) NF EN ISO 10 012 : Systèmes de management de la mesure Exigences pour les processus et les équipements de mesure.



Exemple de diagramme 5M résultat d'un travail d'équipe autour de l'incertitude de mesure du % de CO₂ d'un analyseur de fumée d'un cracker catalytique [source F.Authouart].

Comment faire lorsqu'il s'agit par exemple d'évaluer l'incertitude sur la température dans un réacteur affichée en salle de contrôle ? La quantité d'hydrocarbure comptée par une pompe à essence ? La vitesse des automobiles mesurée par cinémomètre ?

Cas de la métrologie légale

En métrologie légale, les règles du jeu sont définies dans les textes réglementaires. Ce qui se cache derrière les "règles du jeu" s'appelle les standards de conception, de validation d'installation et de vérifications périodiques. De nombreuses personnes résumant trop souvent la métrologie légale à la vignette verte collée sur la pompe à essence, mais avez-vous remarqué que les instruments de métrologie légale d'une même catégorie se ressemblent tous ? Les cinémomètres sont tous de mêmes types, installés de la même manière. Cette similitude se retrouve aussi pour les compteurs d'eau,

les taximètres, les comptages de gaz ou d'hydrocarbures. Un des objectifs de cette standardisation est d'uniformiser la valeur de l'incertitude. Si vous avez à faire un calcul d'incertitude sur la mesure d'un cinémomètre situé en Bretagne, vous pourrez faire le même calcul sur un autre cinémomètre du même type installé en Alsace. Au travers de ces règles parfois rigides se cache le secret de l'équité de traitement des citoyens, c'est l'ADN historique de la métrologie légale. Si ces règles sont respectées alors le niveau de confiance des résultats des équipements de mesure réglementés est le même partout en France.

Cette approche est séduisante et on pourrait imaginer la retrouver en industrie. Cela serait possible, mais reviendrait à réglementer tous les systèmes de mesure. Or, d'une entreprise à l'autre, on ne va pas utiliser les mêmes instruments, les mêmes convertisseurs de mesure, les

mêmes systèmes de supervision, on ne va pas placer les capteurs aux mêmes endroits dans les tuyauteries, on ne va pas tous mesurer le même fluide, les opérateurs ne seront pas tous les mêmes... Bref, standardiser les systèmes de mesure est impossible et serait même contre-productif. Si on ne peut pas standardiser les installations, et par la même l'incertitude de mesure, il faut s'adapter et faire du cas par cas.

C'est lorsqu'on a compris qu'évaluer l'incertitude de mesure en industrie relève du travail de terrain et est spécifique à chaque processus de fabrication ou d'analyse que l'on comprend l'importance du métrologue.

Sur les systèmes de mesure non réglementés, son rôle sera le suivant : animer la mise en œuvre de l'estimation de l'incertitude de mesure.

Pour réussir cette mission, le métrologue réunit autour de lui une équipe pluridisciplinaire composée d'opérateurs, de techniciens de maintenance, de spécialistes du procédé... Son objectif est de travailler avec toutes ces personnes pour renseigner par exemple le diagramme

« Ce raisonnement simple serait très rassurant, car il ferait porter à l'instrument toute la responsabilité de l'incertitude. »

5M. Attention, ce n'est pas au métrologue de réaliser ce travail seul dans son coin, il doit le partager, l'ouvrir, le faire vivre.

Cette mission est passionnante et souvent plus difficile que celle qui consiste à réaliser des étalonnages. Faire travailler des personnes en équipe n'est pas simple et demande des qualités de pédagogue et d'animateur de réunion.

Une fois le diagramme 5M réalisé, il faudra passer à la phase d'évaluation de l'impact de ces causes d'incertitude sur le résultat final.

Il s'agit là d'estimer la variabilité de chacune des sources d'incertitudes et leur propagation sur la dispersion du résultat final. Le métrologue pourra alors éditer un plan d'action avec des tâches pour chaque membre de l'équipe.

Par exemple :

- pour le chef d'atelier, faire mesurer le même objet par plusieurs opérateurs pour évaluer l'influence de ces derniers (reproductibilité interopérateurs) ;
- pour les techniciens de maintenance, recueillir les caractéristiques techniques des chaînes de mesure ;
- pour l'équipe du procédé, obtenir la variation de la masse volumique du produit en fonction de la température.

Ce plan d'action peut prendre plusieurs mois pour être réalisé. Évaluer l'incertitude sur un processus de mesure est donc un travail de longue haleine qui doit être soutenu par la hiérarchie. Natu-



Dans un monde où les données sont « massives » et exploitables facilement, les industriels s'attacheront à comprendre les conditions d'obtention des « produits » satisfaisants pour pouvoir les reproduire, plutôt que s'imposer de suivre des recettes empiriques souvent trop coûteuses, car rarement optimales.

rellement, cette mission n'est à mener que sur les processus de mesure critiques, ceux qui engagent un risque pour la sécurité, la qualité, l'environnement (voir diagramme 5M sur la mesure du CO₂ en raffinerie).

Réaliser un calcul d'incertitude sur un processus d'étalonnage peut paraître compliqué, mais est plutôt simple au regard de celui d'un processus de mesure industriel. Les grandeurs d'influence sont souvent bien définies, il est généralement possible de réaliser des mesures dans des conditions de répétabilité, les étalons ont des incertitudes connues, les

outils de génération ou de comparaison sont caractérisés... Néanmoins cette incertitude de mesure, si utile soit-elle, ne concerne que l'étalonnage. Si les métrologues d'entreprise souhaitent développer leur activité, lui donner plus de visibilité auprès de la direction, il leur faudra quitter le monde des étalonnages pour celui des processus de mesure industriels.

Le prochain article portera sur la confirmation métrologique. Les différentes étapes qui conduisent à autoriser ou non un processus de mesure à être utilisé ●

Frédéric vient de nous décrire la mission qui devrait occuper l'essentiel du temps de travail d'un métrologue. Malheureusement, il est rare que ce dernier se consacre à l'évaluation des incertitudes de mesure, tant il est généralement accaparé par la gestion de ses étalonnages internes et sous-traités. Et il est assez facile de comprendre l'origine de cette situation...

Dans le monde des échanges commerciaux, la confiance dans les mesures passe apparemment par la vérification

périodique des instruments de mesure, mais ce n'est la partie visible de l'iceberg. Dans ce monde, et comme le rappelle Frédéric, l'État a pris à sa charge la validation de la technologie des instruments utilisés et l'impact des conditions de leur mise en œuvre sur le terrain. Pour garantir la loyauté, il a également organisé leur vérification périodique qui se matérialise par la fameuse étiquette verte. Tout ce travail et cette organisation ont porté leurs fruits : le consommateur a confiance dans le résultat à tel

point qu'il considère aujourd'hui la valeur mesurée comme vraie. Que de chemin parcouru depuis les cahiers de doléances dans lesquels les Français réclamaient « un poids et une mesure » !

Dans ce monde qui est né en 1837, les mesures du quotidien sont peu à peu devenues fiables (pour l'usage) jusqu'à devenir ce qu'elles sont aujourd'hui dans la tête de presque tout le monde : justes. Or, nous sommes tous nés dans ce monde et nous avons acquis inconsciemment, depuis

notre plus jeune âge, cette croyance selon laquelle les mesures seraient justes. Bien sûr, personne ne nous l'a jamais dit explicitement, mais personne ne nous a dit le contraire non plus. Depuis toujours, nous entendons des résultats de mesure sous la forme d'une valeur unique, celle indiquée par l'instrument, et nous avons donc fini par faire en sorte que cette valeur soit suffisante.

En effet, notre système industriel actuel repose en grande partie sur cette croyance. Les tolérances et spécifications qui nous sont demandées ont fait leurs preuves dans ce monde de valeurs mesurées considérées vraies. Les tolérances ont été le plus souvent mises au point empiriquement, jusqu'à ce que le produit (au sens large) donne satisfaction, c'est-à-dire remplisse sa fonction. Ainsi, elles sont souvent conçues par et pour des valeurs mesurées, pas systématiquement pour des valeurs vraies. Dans ce monde, il « suffit » de mesurer comme on a toujours mesuré et de respecter la tolérance pour assurer la fonction, puisque c'est en mesurant dans la spécification qu'on a mis au point « la recette ». Et ce système s'est fondé en organisant la vérification périodique des instruments de mesure. Du coup, tout naturellement, l'industrie s'attache à vérifier ses instruments de mesure et occupe beaucoup d'énergie à cela, mais est-ce raisonnable ?

« Une méthode qui apporte de la rigueur et qui limite les oublis de grandeurs d'influence. »

MESURER LE BIG DATA

Souvent à l'avant-garde des pratiques en matière de métrologie, Delta Mu s'investit dans cet avenir prometteur pour les industriels en général et pour les métrologues en particulier. Nous lançons la première version d'un tout nouveau site internet début mai. Ce site est destiné à sensibiliser tous les acteurs de l'usine du futur (métrologues, ingénieur process, data scientist, direction industrielle...) à cette question de la fiabilité des mesures. Vous pourrez notamment télécharger gratuitement un document qui reprend quelques exemples réels qui prouvent à quel point « mesure » et « réalité » ne font pas toujours bon ménage !

+ SUR LE WEB

www.mesuronsbienlebigdata.com

« Le consommateur a confiance dans le résultat à tel point qu'il considère aujourd'hui la valeur mesurée comme vraie. »

Les incertitudes de mesure existent et il suffit le plus souvent pour s'en convaincre de faire répéter les mêmes mesures au même opérateur, puis de changer l'opérateur, pour observer que la mesure varie, et parfois considérablement. En modifiant les conditions de mesure (en arrêtant la hotte, suivant l'anecdote racontée par Frédéric ou en modifiant la température ambiante), on peut également observer une variation du résultat de la valeur indiquée par l'instrument. Il en va ainsi pour de nombreux facteurs... Un processus de mesure est un processus à part entière qui, comme tous les processus, est perturbé par chacun de ses facteurs, c'est inexorable. L'identification et la quantification des causes à l'origine des dispersions sont un travail à part entière, pas toujours aisé. Frédéric a décrit une bonne approche pour venir à bout de cette question, mais qui va vouloir s'y investir sans espoir de retour réel ? En effet, dans le monde dont nous avons hérité, le problème des incertitudes de mesure a été contourné, comme nous l'avons vu plus haut, en établissant des tolérances *a priori* adaptées ensuite

empiriquement par la fonction. Elles sont sûrement beaucoup plus petites que le besoin réel, mais ce sont elles qui, aujourd'hui, font foi. Mais à quel prix ?

En revanche, dans le monde dans lequel nous semblons nous diriger, les choses seront très différentes. Qu'on l'appelle industrie 4.0, usine du futur, *Smart Factory*, le futur industriel s'appuiera probablement beaucoup plus qu'aujourd'hui sur l'analyse des expériences positives, c'est-à-dire sur des recettes *a posteriori*. Dans un monde où les données sont « massives » (big data, lire le focus technique du dernier numéro) et exploitables facilement (puissance de calcul, data mining), les industriels s'attacheront à comprendre les conditions d'obtention des « produits » satisfaisants pour pouvoir les reproduire, plutôt que s'imposer de suivre des recettes empiriques souvent trop coûteuses, car rarement optimales. Dans ce nouveau contexte, la fiabilité des mesures deviendra un impératif pour tendre vers l'efficacité⁽⁴⁾, car elles devront représenter le plus fidèlement possible la réalité pour en décrire les secrets. Demain, il ne s'agira plus de se contenter d'une croyance dans des valeurs mesurées qui seraient vraies ni d'oublier l'incertitude de mesure en l'imaginant négligeable. Il faudra, au contraire, s'attacher à faire la part des choses entre « réalité » et « mesure » pour faire en sorte que ce soit bien la réalité qui soit décrite par les résultats de mesure, et pas simplement, comme c'est parfois (souvent ?) le cas, les erreurs de mesure elles-mêmes ●

(4) Comprendre : « produire au juste nécessaire »